



**TUGAS AKHIR - TM091585**

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK  
YANG DIHASILKAN OLEH MEKANISME  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT  
TIPE PENGUNGKIT DENGAN VARIASI PANJANG  
KAWAT KUMPARAN DAN JUMLAH LILITAN**

**DONI ARDHI DHARMAWAN  
NRP 2112 106 004**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
Surabaya  
2015**



**FINAL PROJECT - TM091585**

**EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF THE  
ELECTRICAL ENERGY GENERATED BY THE  
MECHANISM OF OCEAN WAVE ENERGY POWER  
PLANT LEVER-TYPE WITH VARIATION IN NUMBER  
AND LENGTH OF THE COIL WINDINGS**

**DONI ARDHI DHARMAWAN  
NRP 2112 106 004**

**Academic Supervisor  
Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015**

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK  
YANG DIHASILKAN OLEH MEKANISME  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT  
TIPE PENGUNGKIT DENGAN VARIASI PANJANG  
KUMPARAN DAN JUMLAH LILITAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Bidang Studi Sistem Dinamis dan Vibrasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

**DONI ARDHI DHARMAWAN**

NRP. 2112 106 004

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT  
(NIP. 197004121997032003)

.....  
(Pembimbing)

2. Dr.Eng Harus Laksana Guntur ST, M.Eng  
(NIP. 197505111999031001)

.....  
(Penguji I)

3. Moch Solichin ST., MT  
(NIP. 2100201405003)

.....  
(Penguji II)

4. Ir. Yunarko Triwinarno, MT  
(NIP. 195106031976031002)

.....  
(Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI 2015**

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG  
DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE PENGUNGKIT DENGAN  
VARIASI PANJANG KAWAT KUMPARAN DAN JUMLAH  
LILITAN**

**Nama : Doni Ardhi Dharmawan**  
**NRP : 2112 106 004**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.**

**ABSTRAK**

Indonesia merupakan negara yang memiliki wilayah dengan perairan yang lebih besar dibanding dengan wilayah daratan. Perairan Indonesia memiliki banyak potensi, salah satunya yaitu gelombang laut. Gelombang laut dapat dimanfaatkan untuk kesejahteraan bangsa Indonesia itu sendiri. Dengan mengacu banyaknya pulau Indonesia yang sulit terjangkau oleh perusahaan listrik negara dan mulai menipisnya bahan bakar untuk memproduksi listrik, diperlukan alternatif untuk menyelesaikan permasalahan ini. Salah satu alternatif untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu memanfaatkan gelombang laut menjadi teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe pengungkit.

Pada tugas akhir ini, dilakukan perancangan terhadap sebuah ponton Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) tipe pengungkit. Pembahasan tugas akhir ini, dititikberatkan pada studi eksperimen pengaruh model, panjang kumparan dan jumlah lilitan terhadap energi listrik yang dihasilkan. Dimana panjang kumparan dan jumlah lilitan mempengaruhi panjang *stroke* yang terjadi pada mekanisme *linear generator* sebagai input untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik.

Hasil penelitian dapat disimpulkan voltase DC terbesar untuk variasi panjang kumparan dan jumlah lilitan terjadi pada panjang kumparan 20 mm dengan 3000 lilitan yaitu 0.9986 volt dan voltase terkecil terjadi pada panjang kumparan 25 mm dengan 1000 lilitan yaitu

0.8755 volt. Untuk semua variasi yang dilakukan, penggunaan voltase DC untuk pemanen energi dianggap lebih efektif daripada voltase AC.

**Kata Kunci:** PLTGL tipe pengungkit, *Linear Generator*, Panjang kumparan, Jumlah lilitan, Energi listrik.

**EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF THE  
ELECTRICAL ENERGY GENERATED BY THE MECHANISM  
OF OCEAN WAVE ENERGY POWER PLANT LEVER-TYPE  
WITH VARIATION IN NUMBER AND LENGTH OF THE COIL  
WINDINGS**

**Student Name : Doni Ardhi Dharmawan**  
**NRP : 2112 106 004**  
**Department : Mechanical Engineering**  
**Academic Supervisor : Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.**

**ABSTRACT**

Indonesia is a country that has a sea region greater than land area. Indonesian sea has a lot of potential, one of that is the wave of the sea. Ocean waves can be utilized for the welfare of the Indonesian nation. With reference the large number of Indonesian islands, are difficult reached by the state electricity company and started the depletion of fuel to produce electricity, an alternative energy is needed to solve this problem. One alternative to solve this problems is converting energy from the wave of the sea, in this case using ocean energy harvesting with lever-type

In this final project, a characteristic study will be held from a design on Sea Wave Power Plant (PLTGL) lever type. the study focused on the influence of the model experiments, coil length and number of turns of the coil with electrical energy generated. Where the length of the coil and the number of windings affect stroke length that occurs in a linear generator.

The results of this study concluded the largest DC voltage to the coil length variation and the amount of twist occurs is in the coil length 20 mm with coil 3000 is 0.9986 volts and the voltage occurs at the smallest length of 25 mm to 1000 coil windings is 0.8755 volts. For all the variations that do, use a DC voltage for energy harvesters are considered more effective than the voltage of the AC.

**Keywords:** PLTGL *lever-type*, Linear Generator, coil length, amount of windings, electrical energy.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah*, segala puji bagi Allah yang telah memberikan segenap cinta kepada hambaNya, dengan cinta yang diberikan melalui orang-orang di sekeliling hambaNya. Merupakan karunia dan pertolongan Allah pada setiap langkah dalam penyusunan Tugas Akhir ini sehingga dapat terselesaikan.

Melalui lembaran ini penulis hendak mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan terima kasih penulis kepada:

1. Ibu dan Bapak yang tercinta, yang telah menjaga, merawat dan banyak mendoakan dengan tulus.
2. Yudha Satria dan Dody Kusuma, saudaraku yang selalu memberikan perhatian terhadap proses penelitian ini.
3. Ibu Wiwiek Hendrowati selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
4. Bapak Harus L Guntur, Bpk. Yunarko, dan Bpk. Solichin selaku dosen Penguji seminar dan Sidang Tugas Akhir
5. Rekan Tugas Akhir, Arif Pradipta Maris yang telah sabar membimbing saya sampai selesai, dan teman teman “Ocean Wave Energy”.
6. Imam Nugroho sebagai drafter, para musisi dari kontrakan Sorowako, teman-teman Lab pendingin dan para penghuni Lab Vibrasi, terimakasih karena telah menemani penulis dalam mencurahkan pikiran dan tenaga untuk terselesaikannya penelitian ini.
7. Teman seperjuangan Lintas Jalur Genap 2012 yang mempunyai semangat yang luar biasa, yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.
8. Pihak-pihak lain yang selalu mendukung dan mendoakan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik



Penulis menyadari tugas Akhir ini masih belum sempurna, maka kritik dan saran diperlukan dalam penyempurnaan penyusunan Tugas Akhir ini. semoga bermanfaat bagi perkembangan penelitian energi di Indonesia.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
ABSTRAK .....	iv
KATA PENGANTAR .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR SIMBOL .....	xv

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.1.1 Dasar Teori Gelombang Laut .....	7
2.1.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut.....	10
2.1.2.1 Gaya yang Dibangkitkan Gelombang .....	10
2.1.2.2 Power Wave .....	11
2.1.2.3 Bouyancy Force.....	11
2.2 Mekanika Getaran .....	12
2.2.1 Amplitudo .....	13
2.2.2 Frekuensi .....	13
2.3 Dasar Teori Elektromagnetik.....	14
2.3.1 Induksi Magnet .....	14
2.3.2 Arus Listrik oleh Gaya Magnetik .....	18
2.3.3 Medan Magnet pada Rangkaian Solenoidal .....	20
2.4 Gaya-gaya yang bekerja pada mekanisme.....	22
2.4.1 Distribusi gaya pada pelampung.....	22
2.4.2 Power yang dihasilkan mekanisme.....	23
2.4.2.1 Keseimbangan dinamis pada batang.....	23

2.4.2.2 Kecepatan translasi magnet .....	24
2.4.2.3 Analisa Power pada Linear Generator.....	25
2.4.2.4 Respon massa magnet.....	27

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1 Diagram Alir Tugas Akhir .....	29
3.2 Tahapan Pengerjaan Tugas Akhir .....	31
3.2.1 Studi Literatur .....	31
3.2.2 Identifikasi dan Perumusan masalah .....	31
3.2.3 Rancang Bangun PLTGL .....	31
3.3 Hubungan antara variasi dengan output listrik.....	35
3.4 Tahap Pengujian.....	37
3.4.1 Peralatan pengujian .....	37
3.4.2 Pengambilan Data .....	39
3.4.2.1 Diagram Alir Pengambilan Data .....	39
3.5 Format Lembar Pengambilan Data .....	41
3.6 Analisa dan Pengolahan Data.....	41

### **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1 Pengambilan dan Pengolahan Data .....	43
4.2 Contoh Perhitungan .....	44
4.3 Data Pengujian .....	49
4.4 Grafik Pengujian .....	51
4.4.1 Variasi Panjang Kumparan ( $L = 1$ ) .....	51
4.4.2 Variasi Panjang Kumparan ( $L = 2$ ) .....	52
4.4.3 Variasi Panjang Kumparan ( $L = 3$ ) .....	53
4.4.3 Variasi Jumlah Lilitan ( $N = 1$ ) .....	54
4.4.3 Variasi Jumlah Lilitan ( $N = 2$ ) .....	56
4.4.3 Variasi Jumlah Lilitan ( $N = 3$ ) .....	58
4.5 Pembahasan Grafik .....	59
4.5.1 Perbandingan Voltase yang Dihasilkan .....	59
4.6 Hasil perbandingan Analisa Teori dengan Pengujian ....	65
4.7 Effisiensi Mekanisme .....	67

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	69
5.2 Saran .....	70

DAFTAR PUSTAKA .....	71
----------------------	----

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Perbandingan Prototype dan Rancangan Produk Komersil .....	7
Tabel 3.1	Contoh Tabel Data Hasi Pengujian .....	41
Tabel 4.1	Voltase Bangkitan dari Perhitungan Teoritis .....	48
Tabel 4.2	Perbandingan Voltase DC dengan AC Pengujian ..	59
Tabel 4.3	Perbandingan Power hasil Perhitungan dengan Pengujian .....	65
Tabel 4.4	Tabel Data Effisiensi Variasi Jumlah .....	67

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konsep PLTGL dengan Model Skala 1:40 .....	5
Gambar 2.2. Konsep PLTGL dengan Model Skala 1:10.....	6
Gambar 2.3. Konsep PLTGL dengan Model Skala 1:10.....	6
Gambar 2.4. Skets Gelombang Laut.....	8
Gambar 2.5. Gelombang Laut non-Linier .....	9
Gambar 2.6. Analisa Gaya yang dihasilkan Pelampung .....	10
Gambar 2.7. Kondisi Benda dalam Air .....	12
Gambar 2.8. Gerakan pada Bandul .....	13
Gambar 2.9. Gerak Magnet dalam Kumputan.....	14
Gambar 2.10. Kumputan yang ditembus Fluks Magnetik.....	16
Gambar 2.11. Muatan dalam Kawat Berarus Listrik mengalami gaya magnetik.....	18
Gambar 2.12. Elemen atau kawat yang dialiri Arus.....	18
Gambar 2.13. Hubungan Vektor antara Gaya Magnet pada sebuah Konduktor .....	19
Gambar 2.14. Garis Gaya Magnetik yang menimbulkan arus solenoid.....	20
Gambar 2.15. Perhitungan Medan Magnetik pada titik P pada Sumbu Solenoid.....	21
Gambar 2.16. Gaya yang Bekerja pada Pelampung .....	22
Gambar 2.17. Diagram Gaya Keseimbangan Dinamis .....	23
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> Penelitian .....	30
Gambar 3.2. Prototipe Pengungkit .....	32
Gambar 3.3. Pelampung .....	33
Gambar 3.4. <i>Housing</i> .....	33
Gambar 3.5. Magnet.....	34
Gambar 3.6. Kumputan .....	34
Gambar 3.7. Lengan Pengungkit.....	35
Gambar 3.8. Kolam.....	37
Gambar 3.9. PLTGL tipe Pengungkit .....	38
Gambar 3.10. <i>Digital Storage Oscilloscope</i> .....	38
Gambar 3.11. Diagram Alir Pengambilan Data .....	40
Gambar 4.1. Data Percobaan pada <i>Oscilloscope</i> .....	43



Gambar 4.2. Analisa Gaya pada Mekanisme .....	44
Gambar 4.3. Grafik Daya Hasil Perhitungan secara Teoritis ...	49
Gambar 4.4. Grafik Voltase DC Output dengan Matlab .....	50
Gambar 4.5. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 15 mm .....	51
Gambar 4.6. Grafik voltase DC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 15 mm .....	51
Gambar 4.7. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 20 mm .....	52
Gambar 4.8. Grafik voltase DC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 20 mm .....	52
Gambar 4.9. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 25 mm .....	53
Gambar 4.10. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk Panjang Kumparan 25 mm.....	53
Gambar 4.11. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk 1000 lilitan. ....	54
Gambar 4.12. Grafik voltase DC Fungsi Waktu untuk 1000 lilitan.....	54
Gambar 4.13. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk 2000 lilitan.....	56
Gambar 4.14. Grafik voltase DC Fungsi Waktu untuk 2000 lilitan.....	56
Gambar 4.15. Grafik voltase AC Fungsi Waktu untuk 3000 lilitan.....	58
Gambar 4.16. Grafik voltase DC Fungsi Waktu untuk 3000 lilitan.....	58
Gambar 4.17. Grafik Perbandingan Voltase AC dan DC hasil pengujian panjang 15 mm .....	60
Gambar 4.18. Grafik Perbandingan Voltase AC dan DC hasil pengujian panjang 20 mm .....	61
Gambar 4.19. Grafik Perbandingan Voltase AC dan DC hasil pengujian panjang 25 mm .....	61
Gambar 4.20. Grafik Voltase AC Hasil Pengujian.....	62
Gambar 4.21. Grafik Voltase DC Hasil Pengujian.....	63

Gambar 4.22. Grafik Daya Hasil Pengujian .....	66
Gambar 4.23. Grafik Perbandingan Effisiensi Variasi .....	68

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Permasalahan energi merupakan suatu permasalahan yang penting, karena menyangkut berbagai macam aspek. Kebutuhan akan energi juga tidak dapat dipisahkan dengan kehidupan umat manusia. Manusia menggunakan energi untuk beraktivitas dalam kehidupan sehari-hari. Perkembangan zaman diikuti juga dengan meningkatnya kebutuhan akan energi, sedangkan energi tidak terbarukan yang dihasilkan oleh bumi semakin menipis, sehingga harus menggunakan energi alternatif lain untuk menutupi kekurangan tersebut. Salah satu alternatif sumber energi yang murah, mudah didapat dan melimpah di Indonesia adalah energi ombak atau energi gelombang laut.

Energi gelombang laut terbentuk oleh angin yang berhembus diatas permukaan laut, dan menyebabkan laut bergerak mengikuti arah angin tersebut. Secara geografi, Indonesia yang terletak diantara 2 samudera yaitu samudera pasifik dan samudera hindia, mempunyai potensi sangat besar untuk mengembangkan energi ini. Untuk memanfaatkan energi gelombang laut tersebut dibutuhkan suatu alat yang bisa bergerak diatas pergerakan gelombang ombak laut dan kuat menahan hantaman dari gelombang tersebut. Idanya adalah membuat pelampung kedap air, menggerakkan engsel pada batang dan menggerakkan pipa berisi kumparan kawat dan magnet yang berfungsi untuk menghasilkan arus listrik.

Pada penelitian ini, dibuat pemanfaatan energi gelombang laut dengan mekanisme pengungkit yang memanfaatkan prinsip GGL induksi menjadi energi listrik untuk skala laboratorium dengan ukuran kolam uji panjang lebar dan tinggi berturut turut adalah (5x1x1) meter. Percobaan Michael Faraday membuktikan bahwa magnet yang digerakkan keluar dan masuk melalui kumparan dapat menghasilkan arus listrik pada kumparan tersebut. Besar atau kecilnya arus listrik yang

dihasilkan pada ujung ujung GGL dipengaruhi oleh 3 faktor, yaitu jumlah lilitan, kuat medan magnet, dan kecepatan gerakan magnet atau kecepatan perubahan garis gaya magnet (fluks magnetik), sedangkan variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah lilitan dan panjang kumparan.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, maka pada penelitian ini dirancang bangun suatu mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) tipe pengungkit dengan menggunakan prinsip GGL Induksi, dimana pada salah satu ujung batangnya dipasang pelampung yang nantinya akan bergerak naik turun sebagai energi inputan dari gelombang air laut, dan pada sisi lainnya dipasang sebuah magnet yang akan bergerak naik turun melewati kumparan kawat, gerakan ini akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Penelitian ini dititikberatkan pada studi eksperimen pengaruh perubahan jumlah lilitan dan panjang kumparan, terhadap energi listrik yang dihasilkan. Gerakan naik turun tersebut juga dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi gelombang air yang mengenai pelampung. Gerakan naik turun tersebut nantinya akan diteruskan pada generator linear yang berupa kumparan kawat dan batang magnet. Dari uraian diatas, maka permasalahan pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana mendesain dan merancang mekanisme PLTGL tipe pengungkit dengan prinsip *GGL Induksi* yang beresilasi secara optimal akibat gelombang air?
2. Berapa banyak jumlah lilitan dan panjang kumparan yang efektif dari variasi yang ada untuk menghasilkan voltase bangkitan dari pengujian Mekanisme Pemanen Energi Gelombang laut dan perhitungan voltase bangkitan secara teori.

3. Bagaimana perbandingan antara voltase bangkitan yang terukur pada pengujian Mekanisme dengan hasil perhitungan voltase bangkitan secara teori.
4. Bagaimana pengaruh perbedaan voltase AC dan DC pada hasil pengujian?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mekanisme PLTGL pada penelitian ini dibuat dan diuji untuk skala laboratorium dengan ukuran kolam uji yaitu panjang , lebar dan tinggi berturut turut adalah (5 x 1 x 1) meter.
2. Gelombang air yang dibuat dianggap konstan pada setiap variasi amplitudo dan frekuensi.
3. Gelombang air yang terjadi dianggap hanya gelombang yang merambat ke satu arah dan bergerak naik turun.
4. Gerakan osilasi magnet melewati kumparan dianggap hanya gerakan vertikal saja.
5. Gesekan yang terjadi antara permanen magnet dan selongsong kumparan diabaikan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan karakteristik energi listrik yang dihasilkan mekanisme PLTGL tipe tersebut akibat pengaruh jumlah lilitan dan panjang lilitan pada mekanisme.
2. Menganalisa perbandingan antara voltase yang terukur pada pengujian Mekanisme Pemanen Energi Gelombang laut dengan hasil perhitungan voltase bangkitan secara teori.

### 1.5 Manfaat Penelitian

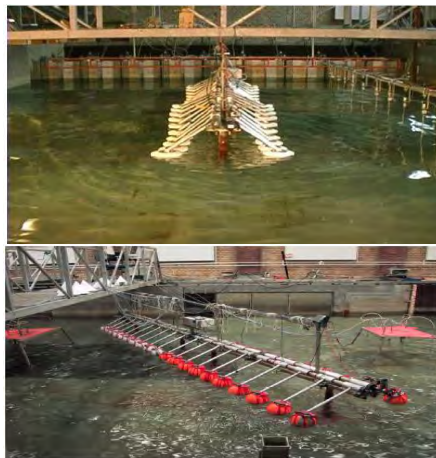
1. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah mengetahui bagaimana desain PLTGL tipe GGL induksi sehingga bisa didapat gerakan *pitching* yang maksimal dan mengoptimalkan besar energi listrik yang dihasilkan.
2. Mengetahui perbandingan antara voltase dan yang terukur pada pengujian mekanisme pemanen energi gelombang laut dengan hasil perhitungan voltase bangkitan secara teori.
3. Hasil tugas akhir ini bisa menjadi dasar pengembangan pada Mekanisme Pemanen Energi Gelombang laut dengan prinsip induksi magnet.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pada tahun 2003 sebuah perusahaan yang didirikan di Denmark, *wave star energy Corp* mengembangkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut, salah satu pembangkit listrik yang dikembangkan adalah menggunakan pelampung (*heavy buoy*) yang telah dibuat *prototype* dan telah diaplikasikan dilaut. Pengembangan dilakukan secara bertahap dimulai dengan skala model pada tahun 2004 – 2005, dilakukan studi numerikal atau pemodelan kemudian dengan model skala 1:40 dilakukan di Aalborg University, Department of Civil Engineering.



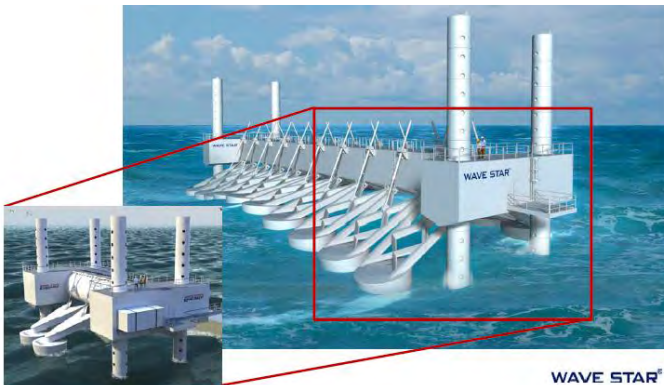
Gambar 2.1. Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Model Skala 1 :40



Pada tahun 2006 – 2008 percobaan dilakukan di Nissim Bredning dengan model skala yang lebih besar yaitu 1 :10 Memiliki panjang 24 meter terdiri dari 40 pelampung dengan diameter pelampung 1 meter, menghasilkan power 1800 Watt, dan untuk skala 1:2 menghasilkan 500kW. Mekanisme memanfaatkan gerakan naik turun dari sistem pelampung, dimana ketika pelampung turun mengisi ruangan silinder, ketika pelampung bergerak naik akan membuka katup ( *Valve* ) untuk menggerakkan generator.



Gambar 2.2. Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Model Skala 1 :10



Gambar 2.3. Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Model Skala 1 : 2

Tabel 2.1 Perbandingan *Prototype* dan Rancangan Produk Komersil

Parameter	Roshage test unit	Commercial Wave Star C5-600 kW
Number of floats	2	20
Float diameter	Φ5 m	Φ5 m
Arm length	10 m	10 m
Weight	1000 Tons	1600 Tons
Nominal electrcal power	110 kW	600 kW

### 2.1.1 Dasar Teori Gelombang Laut

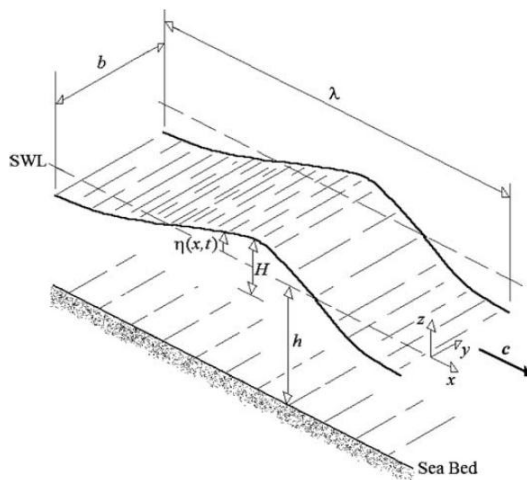
Gelombang laut merupakan energi dalam transisi, energi yang dibawa oleh sifat aslinya. Gelombang permukaan merupakan gambaran yang sederhana untuk menunjukkan bentuk dari suatu energi lautan. Adapun gejala dari energi gelombang laut bersumber pada fenomena – fenomena berikut :

1. Benda yang bergerak pada atau dekat permukaan yang menyebabkan terjadinya gelombang dengan perioda kecil.
2. Angin yang merupakan sumber penyebab utama gelombang lautan.
3. Gangguan seismik yang menyebabkan terjadinya gelombang pasang atau tsunami.
4. Medan gravitasi bumi dan bulan menyebabkan gelombang pasang yang tinggi.

Bentuk gelombang dibagi menjadi berbagi bentuk yang masing – masing memiliki karakteristik dan energi yang berbeda. Secara umum ada dua jenis gelombang yang sering dijumpai,

yaitu gelombang linier dan gelombang non linier. Gelombang linier ini memiliki karakteristik berbentuk sinusoidal dengan panjang gelombang yang lebih besar dari tinggi gelombangnya ( Astu Pudjanarsa, Djati Nursuhud. 2007 ).

Teori mengenai gelombang laut pertama kali dikemukakan oleh Airy pada tahun 1845. Teori ini paling sederhana tetapi sudah dapat dipakai sebagai dasar dalam merencanakan pelabuhan. Dibawah ini adalah pemodelan gelombang laut linier.



Gambar 2.4. Skets Gelombang Laut

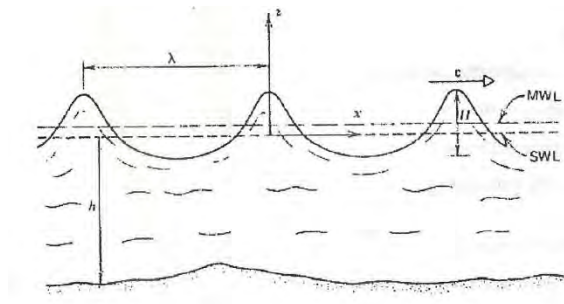
Gambar 2.4 menunjukkan suatu gelombang yang berada pada sistem kordinat x-z. Gelombang menjaral pada sumbu x. Beberapa notasi didalam pemodelan yang dikembangkan oleh Airy seperti gambar diatas adalah :

SWL : *Mean sea water level* ( muka air tenang )

$\lambda$  : *Wave Length* [m]

- h : *Depth below SWL* ( kedalaman ) [m]  
 T : *Wave periode* [s]  
 c : *Kecepatan rambat gelombang* [m/s]  
 H : *Amplitudo gelombang*

Seperti yang telah ditunjukkan gambar 2.4 suatu gelombang linier mempunyai ciri khusus yaitu berbentuk sinusoidal. Suatu gelombang di laut yang dalam dengan nilai  $H/\lambda$  kecil mengalir dengan profil sinusoida merupakan gelombang linier, tetapi bila alunannya mencapai kedangkalan tertentu maka profil gelombangnya akan berubah dengan puncak gelombang yang meruncing disertai dengan panjang gelombang yang mengecil.



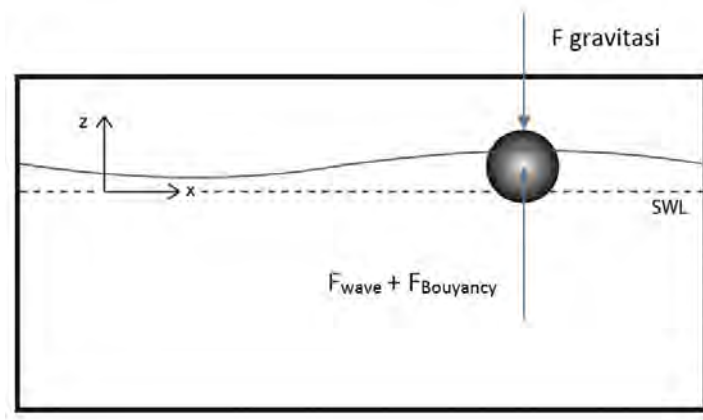
Gambar 2.5. Gelombang Laut non-Linier

Profil tersebut disebabkan oleh pengaruh dasar lautan. Profil gelombang yang terjadi disebut gelombang non-linier. Pada gelombang non-linier, permukaan air laut ( SWL ) dan muka air rata-rata ( MWL ) mempunyai selisih tertentu. Bila batas SWL dan MWL berhimpit maka gelombang non linier akan berubah kembali menjadi gelombang linier. Untuk gelombang non linier, kedudukan SWL selalu dibawah MWL. Menurut pengertian para

ahli, kedudukan MWL adalah selalu berada pada setengah dari puncak gelombang dan dasar gelombang.

## 2.1.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut

### 2.1.2.1 $F_{generated}$ ( Gaya yang Dibangkitkan Gelombang )



Gambar 2.6. Analisa Gaya Pada Pelampung Apung

$F_{generated}$  merupakan resultan gaya yang dihasilkan untuk menggerakkan benda bergerak keatas. Sehingga berlaku persamaan :

$$F_{generated} = \sum F = (F_{wave} + F_{bouyancy}) - F_{gravitasi}$$

$$F_{generated} = \left( \left( \frac{P_{wave}}{c} \right) + (\rho_{fluida} \cdot g \cdot Volume_{fluida}) \right) - m \cdot g \quad (2.1)$$

Dimana,  $F_{\text{generated}}$  adalah gaya yang ditransferkan oleh gelombang,  $F_{\text{wave}}$  adalah gaya yang dihasilkan oleh gelombang,  $F_{\text{buoyancy}}$  adalah gaya apung pelampung,  $F_{\text{gravitasi}}$  adalah gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang.

### 2.1.2.2 Power Wave ( Energi dari Gelombang )

Energi potensial pada gelombang berhubungan dengan tinggi gelombang, sedangkan energi kinetik berhubungan dengan pergerakan dari partikel. Transfer dari energi gelombang dari tiap titik ke titik lainnya dalam satu arah pergerakan gelombang dikarakteristikan sebagai energi flux atau umum disebut sebagai *wave power* :

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (2.2)$$

Dimana  $P_{\text{wave}}$  adalah daya gelombang ( watt ),  $\rho$  adalah massa jenis fluida (air tawar  $1000 \text{ kg/m}^3$  ),  $g$  adalah percepatan gravitasi (  $9.8 \text{ m/s}^2$  ),  $H$  adalah tinggi gelombang ( m ),  $T$  adalah periode gelombang ( sekon ).  $c$  adalah kecepatan rambat gelombang , persamaannya

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.3)$$

Dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang ( m ),  $T$  adalah periode gelombang (sekon).

### 2.1.2.3 Bouyancy Force ( Gaya Bouyancy )

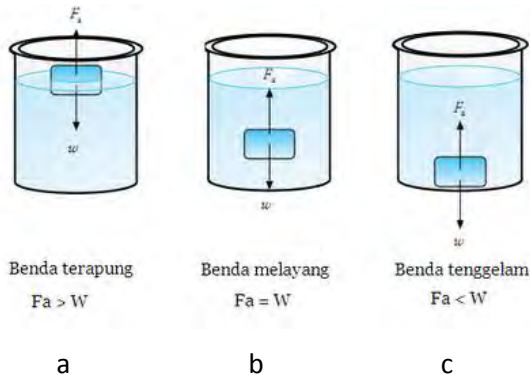
Gaya Bouyancy (  $F_a$  ) atau gaya apung , yaitu gaya tekan keatas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air

yang dipindahkan ( *Archimedes Principle* ). Gaya buoyancy selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan.

$$F_a = \rho_{fluida} \cdot V_{fluida} \cdot g \quad (2.4)$$

dimana,

$$V_{fluida} = \frac{\rho_{Benda} \cdot V_{Benda}}{\rho_{fluida}} \quad (2.5)$$



Gambar 2.7. (a) Benda Terapung, (b) Benda Melayang, (c) Benda Tenggelam

## 2.2 Mekanika Getaran

Secara umum getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangan. Setiap komponen mekanikal memiliki berat dan *properties* yang menyerupai pegas, ada dua kelompok umum dari getaran, yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

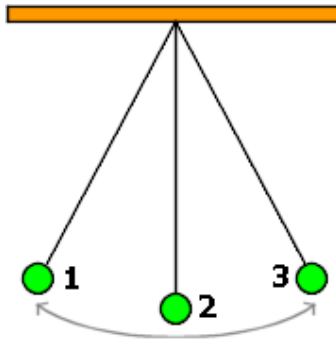
Getaran memiliki ciri-ciri, di antaranya:

1. Untuk menempuh lintasan satu getaran diperlukan waktu yang biasa disebut periode
2. Banyaknya getaran dalam satu sekon disebut frekuensi ( $f$ )

Semua sistem yang bergetar mengalami redaman sampai derajat tertentu karena energi terdisipasi oleh gesekan dan tahanan lain. Jika redaman kecil maka pengaruhnya sangat kecil terhadap frekuensi naturalnya, dan perhitungan frekuensi natural biasanya dilakukan atas dasar tidak ada redaman.

### 2.2.1 Amplitudo

Amplitudo adalah pengukuran skalar yang nonnegatif dari besar osilasi suatu gelombang. Amplitudo juga dapat didefinisikan sebagai jarak terjauh dari garis kesetimbangan dalam gelombang sinusoide dihitung dari kedudukan seimbang.



Gambar 2.8. Gerakan pada bandul

2 = titik setimbang ; 1 dan 3 = titik terjauh (Amplitudo)

### 2.2.2 Frekuensi

Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam satuan waktu yang diberikan. Secara alternatif, seseorang bisa mengukur waktu antara dua buah kejadian /



peristiwa (dan menyebutnya sebagai periode), lalu memperhitungkan frekuensi ( $f$ ) sebagai hasil kebalikan dari periode ( $T$ ), seperti nampak dari rumus di bawah ini :

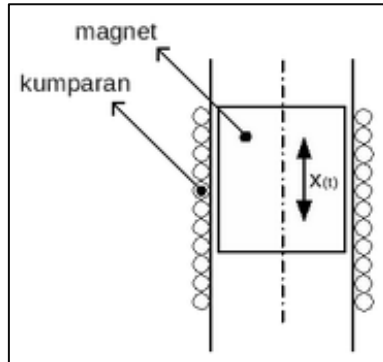
$$f = \frac{1}{T} \quad (2.6)$$

dengan  $f$  adalah frekuensi (hertz) dan  $T$  periode (sekon atau detik).

## 2.3 Dasar Teori Elektromagnetik

### 2.3.1 Induksi Magnet

Energi dapat dikategorikan menjadi banyak macam, namun terdapat dua bentuk energi mekanik yang dapat dikaitkan dengan pembahasan mekanisme pemanen energi getaran, khususnya getaran dari gelombang laut yaitu dengan menggunakan energi potensial gravitasi yang terkait dengan posisi dan energi kinetik yang terkait dengan gerak magnet



Gambar 2.9. Gerak magnet dalam kumparan

Michael Faraday (1791-1867) membuat hipotesis bahwa medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Dengan medan magnet atau fluks yang dapat berubah ubah, maka pada kumparan

akan timbul gaya gerak listrik (ggl) sebesar.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.7)$$

atau bisa dituliskan

$$e = -N \frac{d(B.A)}{dt} \quad (2.8)$$

dimana  $B$  = Gaya magnet

$N$  = jumlah lilitan pada kumparan

$\lambda = N.\Phi$  merupakan *flux linkage*

$\Phi$  = harga fluks yang berubah ubah terhadap waktu

$A$  = luas penampang yang memotong gaya gerak listrik

Jika kerapatan fluks dan luas penampang merupakan besaran konstan, dan,  $f = \frac{1}{T}$  adalah frekuensi gerak magnet tertinggal  $90^\circ$  dari fluks  $\Phi$ . Dengan demikian, gaya gerak listrik yang dihasilkan adalah sebesar

$$e = N.B.A.f \quad (2.9)$$

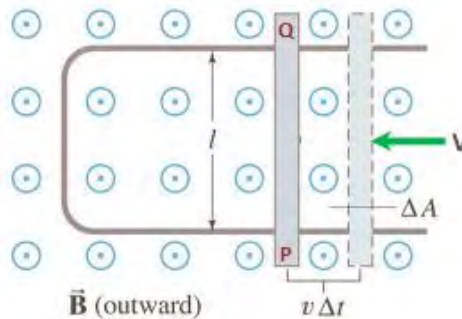
Persamaan 2.9 Menyatakan bahwa besarnya gaya gerak listrik yang dihasilkan tergantung pada jumlah lilitan, besarnya fluks magnet, luasan penampang yang memotong gaya gerak

listrik, dan frekuensi gerak magnet.

Jika GGL induksi yang terjadi adalah  $\varepsilon$  dan kuat arusnya adalah  $I$ , tenaga listrik yang terjadi dalam perubahan waktu adalah

$$W = \varepsilon \cdot I \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

Gambar 2.10 menjelaskan sebuah kumparan  $N$  lilitan ditembus fluks magnetik dengan laju  $\frac{d\Phi}{dt}$  sehingga akan menimbulkan GGL induksi



Gambar 2.10 Kumparan yang ditembusi fluks magnetik dengan laju  $v$

Bila penghantar PQ (panjang =  $\ell$ ) digeser ke kiri dengan kelajuan  $v$  di dalam medan  $B$ , maka akan terjadi GGL induksi.

Tenaga listrik ini berasal dari tenaga mekanik yaitu tenaga untuk menggerakkan magnet di dalam kumparan.

$$W = F \cdot s$$

$$W = B \cdot I \cdot \ell \cdot s$$

$$W = B \cdot I \cdot \ell \cdot v \cdot \Delta t \quad (2.11)$$

Dari substitusi persamaan (2.9) dan (2.10), maka GGL induksi akibat pengaruh panjang kumparan adalah

$$\varepsilon \cdot I \cdot \Delta t = B \cdot I \cdot \ell \cdot v \cdot \Delta t$$

$$\varepsilon_{ggl} = B \cdot l \cdot v \quad (2.12)$$

bisa juga dirumuskan sebagai kumparan dengan N lilitan ditembus fluks magnetik, maka pada kumparan timbul GGL induksi yang disebut dengan  $\varepsilon_{ind}$  hukum faraday dinyatakan sebagai berikut:

$$e_{ind} = N \frac{dF}{dt} \quad (2.13)$$

Menjadi,

$$e_{ind} = B \cdot l \cdot v \quad (2.14)$$

dimana,  $B$  = induksi magnetik (weber / m<sup>2</sup>)

$l$  = panjang kumparan ( m )

$v$  = kelajuan ( m/s )

$e_{ind}$  = GGL induksi (V)

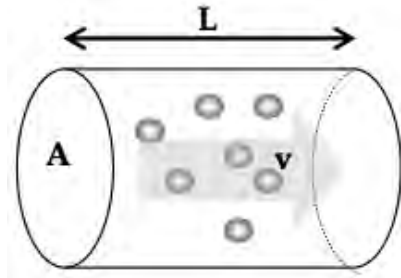
$N$  = jumlah lilitan (tak bersatuan)

$F$  = fluks magnetik (weber)

$T$  = waktu (s)

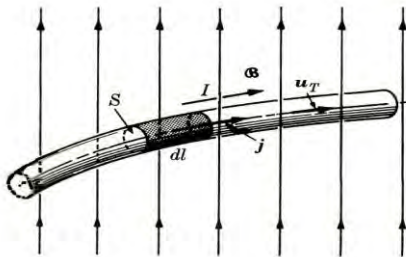
### 2.3.2 Arus Listrik oleh Gaya Magnetik

Kawat yang dialiri arus listrik secara mikroskopis merupakan sejumlah muatan yang bergerak, jika kawat tersebut berda dalam pengaruh medan magnet, maka kawat berarus listrik pun mengalami gaya magnetik seperti halnya muatan yang bergerak.



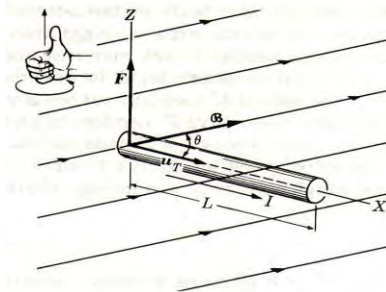
Gambar 2.11 Muatan dalam kawat berarus listrik mengalami gaya magnetik

(Sumber: <http://yasmanrianto.staff.gunadarma.ac.id>)



Gambar 2.12 Elemen kawat atau filamen yang dialiri arus

(Sumber: Matsch, Leander W. “*Electromagnetic & Electromechanical Machines*”, 2<sup>nd</sup> edition.1977)



Gambar 2.13 Hubungan vektor antara gaya magnet pada sebuah konduktor yang membawa arus dan medan magnetik. Gaya tersebut tegak lurus terhadap bidang yang melalui  $u_T$  dan B

(Sumber: Matsch, Leander W. “*Electromagnetic & Electromechanical Machines*”, 2<sup>nd</sup> edition.1977)

Tiap muatan pada kawat mengalami gaya Lorentz, sehingga total gaya magnetik pada kawat berarus dengan banyaknya muatan n adalah :

$$F = q(vdxB)nA \quad (2.15)$$

karena vektor vd searah dengan vektor L :

$$F = (I LxB) \quad (2.16)$$

maka besarnya gaya magnet pada kawat berarus sepanjang L adalah :

$$F = B.I.L \sin\theta \quad (2.17)$$

dengan  $\theta$  adalah sudut antara kawat terhadap arah medan magnet.

Arus listrik ini berharga nol jika  $\theta = 0^\circ$  dan berharga maksimum pada  $\theta = 90^\circ$

Dimana:  $I$  = Arus listrik

$F$  = Gaya yang dialami oleh pegas

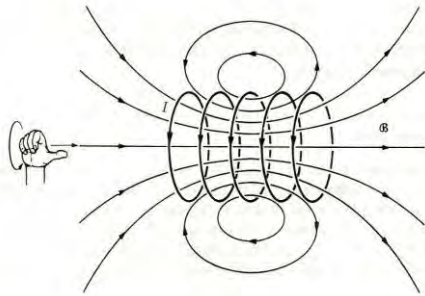
$B$  = Gaya magnet

$L$  = Panjang kawat kumparan

### 2.3.3 Medan Magnet pada Rangkaian Solenoidal

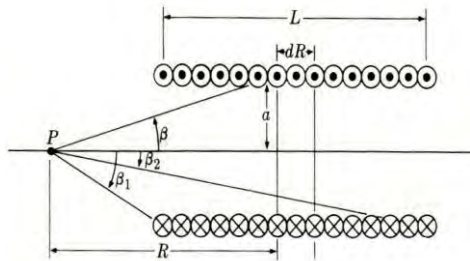
Rangkaian solenoidal adalah rangkaian yang terdiri dari beberapa loop melingkar koaksial, dengan jari-jari yang sama dan mengalir arus yang sama juga. Jika  $L$  adalah panjang dan  $N$  jumlah loop, jumlah loop per unit panjang adalah  $N/L$  dan jumlah loop dipenampang sepanjang  $dR$  adalah  $(N/L)dR$ . Maka medan magnet dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$B = \left[ \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + R^2)^{3/2}} \right] \frac{N}{L} dR = \frac{\mu_0 I N}{2L} \frac{a^2 dR}{(a^2 + R^2)^{3/2}} \quad (2.18)$$



Gambar 2.14 Garis-garis gaya magnetik yang menimbulkan arus solenoid

(Sumber: Matsch, Leander W. “*Electromagnetic & Electromechanical Machines*”, 2<sup>nd</sup> edition.1977)



Gambar 2.15 Penghitungan medan magnet pada titik P yang terletak pada sumbu solenoid

(Sumber: Matsch, Leander W. “*Electromagnetic & Electromechanical Machines*”, 2<sup>nd</sup> edition.1977)

Dari Gambar 2.14  $R = a \cot \beta$ ,  $dR = -a \csc^2 \beta d\beta$ , dan  $a^2 + R^2 = a^2 \csc^2$ . Dengan mensubstitusikan harga-harga tersebut maka didapatkan:

$$dB = \frac{\mu_0 IN}{2L} (-\sin \beta d\beta) \quad (2.19)$$

Dengan mengintegrasikan maka didapat:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2L} \int_{\beta_1}^{\beta_2} -\sin \beta d\beta = \frac{\mu_0 IN}{2L} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (2.20)$$

dengan menganggap  $\beta_1 \approx \pi$  dan  $\beta_2 \approx 0$  akan menghasilkan



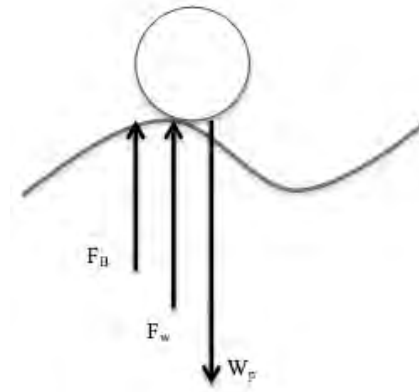
$$B = \frac{\mu_0 IN}{L} \quad (2.21)$$

Dan untuk titik di ujung dengan  $\beta_1 \approx \pi/2$  dan  $\beta_2 \approx 0$  atau  $\beta_1 \approx \pi$  dan  $\beta_2 \approx \pi/2$  maka menjadi :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2L} \quad (2.22)$$

## 2.4 Gaya-gaya yang bekerja pada mekanisme

### 2.4.1 Distribusi gaya pada pelampung

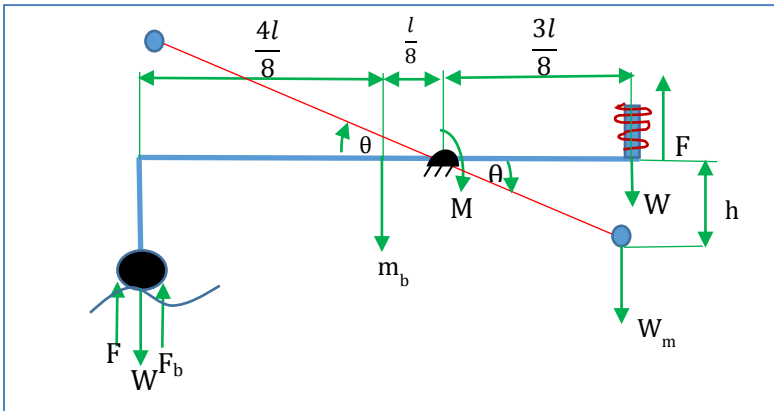


Gambar 2.16 Gaya yang bekerja pada pelampung  
saat kondisi ombak naik

Gaya yang bekerja pada pelampung saat kondisi ombak bergerak ke atas terdiri atas Gaya Ombak ( $F_{\text{wave}}$ ), Gaya Bouyancy ( $F_b$ ), dan Gaya Berat pelampung ( $W_p$ ).

## 2.4.2 Power yang dihasilkan mekanisme

### 2.4.2.1 Kestimbangan Dinamis



Gambar 2.17 Kestimbangan dinamis pada batang ayunan

$$\sum M = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_w \cdot \frac{5l}{8} = \left[ \frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_b \cdot \left(\frac{l}{8}\right)^2 + m_p \cdot \left(\frac{5l}{8}\right)^2 + m_m \cdot \left(\frac{3l}{8}\right)^2 \right] \ddot{\theta} + (5W_p + 3W_m) \frac{l}{8} \cdot \theta + F_d \cdot \frac{3l}{8}$$

dengan  $\ddot{\theta} = \frac{8\ddot{x}}{3l}$  dan  $\theta = \frac{8x}{3l}$  dan analisa sama seperti kondisi 1 maka didapatkan model matematika sistem sebagai berikut;

$$\left[ \frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda} \right] \cdot \frac{5l}{8} = \left[ \frac{1}{12} m_b + \frac{m_b}{64} + \frac{25m_p}{64} + \frac{9m_m}{64} \right] l^2 \cdot \frac{8\ddot{x}}{3l} + (5m_p + 3m_m) g \cdot \frac{l}{8} \cdot \frac{8x}{3l} + \left[ \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \cdot \dot{x} \right] \cdot \frac{3l}{8}$$

$$\left[ \frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda} \right] \cdot \frac{5l}{8} = \left[ \frac{2m_b}{9} + \frac{m_b}{24} + \frac{25m_p}{24} + \frac{3m_m}{8} \right] l \ddot{x} + \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \cdot \frac{8l}{3} \cdot \dot{x} + \left( \frac{5}{3} m_p + m_m \right) g \cdot x \quad (2.23)$$

dari persamaan diatas diperoleh

$$M_{eq} = \left[ \frac{2m_b}{9} + \frac{m_b}{24} + \frac{25m_p}{24} + \frac{3m_m}{8} \right] l$$

$$C_{eq} = \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \frac{3l}{8}$$

$$K_{eq} = \left( \frac{5}{3} m_p + m_m \right) g$$

maka didapat frekuensi natural,  $\omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{M_{eq}}} =$

$$\sqrt{\frac{\left( \frac{5}{3} m_p + m_m \right) g}{\left[ \frac{2m_b}{9} + \frac{m_b}{24} + \frac{25m_p}{24} + \frac{3m_m}{8} \right] l}}$$

$$\text{damping ratio, } \zeta = \frac{C_{eq}}{c_c} = \frac{\left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \frac{3l}{8}}{2 \cdot m_{eq} \cdot \omega_n}$$

#### 2.4.2.2 Kecepatan translasi magnet

Untuk dapat mendapatkan nilai Gaya Damping dan Power Electric dibutuhkan kelajuan ( $v$  atau  $\dot{x}$ ) dari mekanisme linear generator. Nilai tersebut diperoleh melalui persamaan sinusoidal pada gelombang dan penurunan persamaan respon getaran teredam.

Dimana persamaan sinusoidal gelombang :

$$v = \dot{x}(t) = \omega_f X \cos \omega_f \cdot t \quad (2.24)$$

dan hasil penurunan persamaan respon getaran teredam :

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \quad (2.25)$$

dimana  $F_0 = F_w$

$$\text{dan } F_{w(t)} = F_w \sin \omega_f \cdot t \quad (2.26)$$

$$\text{dengan } F_w = \frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda} \quad (2.27)$$

Ket :  $v$  = Kelajuan (m/s)

$\omega_f$  = Frekuensi gelombang (rad/s)

$X$  = Amplitudo gelombang (m)

$T$  = Periode gelombang (s)

$F_w$  = Gaya gelombang laut (N)

$\rho_f$  = Massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$H$  = Tinggi gelombang (m)

$\lambda$  = Panjang gelombang (m)

### 2.4.2.3 Analisa Power Pada Linear Generator

Setelah didapatkan nilai kelajuan dari magnet yang bergerak sesuai mekanisme alat, maka kita dapat membuat persamaan elektromagnetik yang dihasilkan sesuai dengan rumus yang sudah ada, secara detail dapat ditulis:

---

*Tugas Akhir*

*Bidang Studi Desain*

*Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS*

Persamaan gaya lorentz dalam bentuk lain dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned}
 F_L &= B \cdot \frac{\varepsilon_{ggl}}{R} \cdot L \\
 F_L &= B \cdot \frac{\varepsilon_{ggl}}{R} \cdot L \\
 F_L &= B \cdot \frac{B \cdot L \cdot v}{R} \cdot L \\
 F_L &= \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \cdot v
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Gaya lorentz = gaya drag / redaman

$$\begin{aligned}
 F_L &= F_d = c_e \cdot v \\
 c_e &= \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right)
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Maka power yang dihasilkan

$$\begin{aligned}
 P &= \int F_d \dot{x} \\
 &= c_e v \, dv = c_e \dot{x} d\dot{x} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot c_e \cdot \dot{x}^2
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

atau bisa ditulis

- Power Electric,  $P_e = \frac{1}{2} \cdot c_e \cdot \dot{x}^2$

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) v^2 \tag{2.31}$$

---

Ket :	B	= Kuat medan magnet (Weber/m <sup>2</sup> )
	I	= Arus listrik (Ampere)
	L	= Panjang kawat kumparan (m)
	R	= Hambatan kawat (ohm)
	$\rho$	= Massa jenis kawat (kg/m <sup>3</sup> )
	A	= Luas penampang diameter kawat (m)

#### 2.4.2.4 Respon Massa Magnet

Untuk mengetahui seberapa panjang kumparan optimal yang dapat dilewati oleh gerakan translasi pada magnet, perlu dilakukan analisa secara teoritis, besarnya simpangan dan kecepatan linear pada linear generator dapat dicari dengan melihat korelasi antara persamaan gerak, yaitu:

$$x = x_{(t)} = X \sin (\omega_f . t - \phi)$$
$$v = \dot{x}_{(t)} = \omega_f X \cos (\omega_f . t - \phi) \quad (2.32)$$

dan persamaan respon sistem teredam terhadap gaya harmonik:

$$X = \frac{F_w(t)}{\sqrt{(k_{eq} - m_{eq} \cdot \omega_f^2)^2 + (c_{eq} \cdot \omega_f)^2}} \quad (2.33)$$

maka didapat persamaan kecepatan linear pada magnet :

$$\dot{x}(t) = \omega_f \frac{\frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda}}{\sqrt{(k_{eq} - m_{eq} \cdot \omega_f^2)^2 + (c_{eq} \cdot \omega_f)^2}} \cos \omega_f \cdot t \quad (2.34)$$

besar nilai nilai power listrik dapat dituliskan:

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \left[ \omega_f \frac{\frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda}}{\sqrt{(k_{eq} - m_{eq} \cdot \omega_f^2)^2 + (c_{eq} \cdot \omega_f)^2}} \cos \omega_f \cdot t \right]^2 \quad (2.35)$$

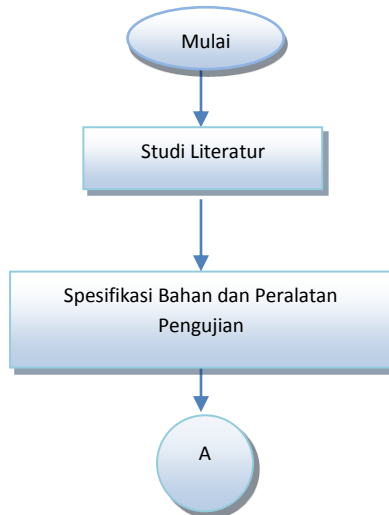
## BAB III

### METODOLOGI

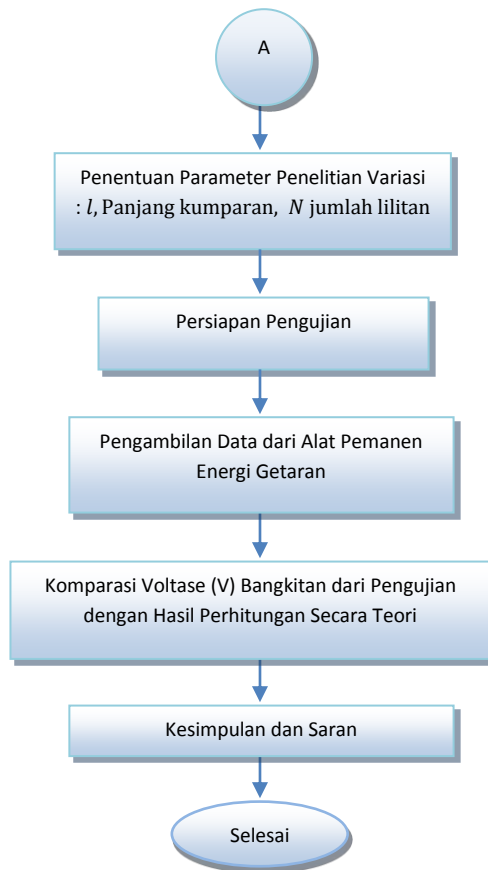
Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang dan mengetahui voltase yang dihasilkan alat pemanen energi listrik PLTGL skala laboratorium dengan menggunakan mekanisme batang ayun dan pembangkit berupa linear generator, maka untuk memenuhi tugas akhir ini dilakukan tahapan-tahapan sebagai berikut:

#### 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

Gambar diagram alir di bawah ini berfungsi untuk menggambarkan beberapa langkah dalam menyelesaikan tugas akhir:







Gambar 3.1 Diagram alir tugas akhir

### **3.2 Tahapan Pengerjaan Tugas Akhir**

Selama pengerjaan tugas akhir ini, penulis membagi pengerjaan tugas ini dalam beberapa tahapan pengerjaan. Tahapan pengerjaan tugas akhir ini antara lain :

#### **3.2 .1 Studi Literatur**

Studi literatur merupakan tahap yang pertama kali dilakukan. Tahap ini dilakukan untuk memperkaya wawasan, pengetahuan, dan landasan tentang materi yang akan dibahas dalam tugas akhir ini. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang menunjang baik melalui media cetak (*textbook, handbook*), *softfile* berupa *ebook* atas karya ilmiah yang telah dilakukan sebelumnya, katalog spare part sistem pengereman kendaraan, maupun media elektronik (internet). Adapun tema yang digali adalah seputar sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL), gelombang laut linier, pengaruh torsi terhadap putaran poros, proses *heaving* pada suatu sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut, dan pengaruh jumlah mekanisme torsi terhadap putaran poros. Untuk mendukung tugas akhir ini diperlukan data-data yang valid sebagai landasan baik yang terdapat didalam buku buku ilmiah maupun jurnal ilmiah.

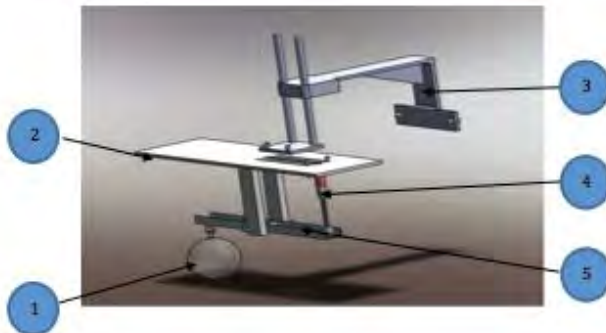
#### **3.2.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah**

Kegiatan yang dilakukan dalam pengidentifikasian masalah dalam penelitian ini adalah mengetahui kinerja dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dengan variasi panjang kumparan dan jumlah lilitan pada linear generator terhadap voltase listrik yang dihasilkan.

#### **3.2.3 Rancang Bangun PLTGL**

Dengan adanya kolam simulasi gelombang laut di jurusan Teknik Mesin ITS, yang memiliki periode, amplitude dan jarak gelombang yang dapat dirubah, maka dibuatlah sebuah mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut ( PLTGL ). Mekanisme yang digunakan dalam penelitian ini

adalah dimodelkan sebagai batang ayun dengan memasang pelampung di salah satu sisinya dan dengan memasang mekanisme linear generator pada ujung lainnya. Dari mekanisme linear generator ini, kemudian dihubungkan dengan voltmeter untuk mengetahui besar voltase yang dihasilkan pada mekanisme pemanen energi tersebut. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan memanfaatkan naik turunnya permukaan air pada kolam, dimana dengan naik turunnya permukaan air, diharapkan pelampung akan mengikuti gerakan tersebut. Ketika pelampung bergerak naik, maka magnet pada mekanisme linear generator bergerak turun, begitu pula sebaliknya, hal ini sesuai dengan prinsip pesawat sederhana, yaitu pengungkit. Gerakan naik turun tersebut dimanfaatkan untuk menggerakkan linear generator, sehingga timbul GGL induksi.



Gambar 3.2. Prototype Mekanisme PLTGL

Keterangan gambar :

1. Pelampung
2. *Housing*
3. *Slider*
4. Magnet dan kumparan
5. Pengungkit

Sebagai wujud dari konsep model PLTGL seperti pada gambar 3.2 maka dibuatlah sebuah model PLTGL lengkap dengan komponen pendukungnya. Berikut ini adalah spesifikasi dari model PLTGL yang akan dibuat. Model PLTGL ini terdiri dari 1 pelampung, 1 lengan, dan ditopang oleh 1 buah engsel yang terletak pada bagian tengah batang. Mekanisme pembangkitnya berupa linear generator yang terletak pada ujung batang yang lain. Berikut ini adalah spesifikasi dari model PLTGL yang akan dibuat:

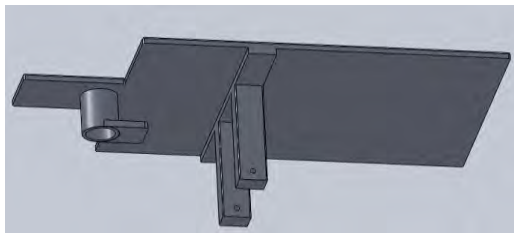
### **1. Bola Pelampung ( *Ball Floater* )**

Pelampung berfungsi untuk menggerakkan lengan pelampung agar dapat naik turun. Bola pelampung ini terbuat dari plastik dan memiliki ukuran 5 inci, Pelampung ini biasanya digunakan untuk aplikasi aliran air rumah otomatis yang dipasang di tendon air.



Gambar 3.3. Bola Pelampung

### **2. *Housing***



Gambar 3.4 *Housing*

*Housing* merupakan tempat kedudukan dari lengan mekanisme, dimana pada *housing* pula terdapat kumparan yang akan menjadi generator.

### 3. Magnet

Magnet yang digunakan adalah magnet keping berjumlah 14 disusun seri, dengan ukuran tiap keping adalah diameter 18mm dan tebal tiap magnet adalah 3mm.



Gambar 3.5. Magnet

### 4. Kawat kumparan

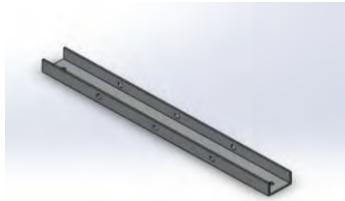
Kawat yang digunakan pada kumparan adalah kawat dengan diameter 0.2 mm dan dililitkan pada pipa plastik dengan diameter pipa plastik 20 mm.



Gambar 3.6. Kawat Kumparan

## 5. Lengan Mekanisme

Lengan mekanisme merupakan komponen yang akan menggerakkan magnet masuk kedalam kumparan sehingga dapat menghasilkan energi listrik dengan prinsip gaya gerak listrik (ggl).



Gambar 3.7 Lengan pengungkit

### 3.3 Hubungan Antara Variasi dengan Output Listrik

Tahapan pengujian dimulai dari mengetahui hubungan persamaan antara massa pelampung, panjang lengan mekanisme, dan torsi yang dihasilkan, sehingga mampu memberikan input gerakan translasi pada mekanisme linear generator. Dari hal tersebut, maka dapat ditentukan dasar dilakukannya proses variasi yaitu panjang kumparan dan jumlah lilitan.

Dari persamaan kesetimbangan dinamis (2.15)

$$F_w \cdot \frac{l}{2} = \left[ \frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_p \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 + m_m \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2 \right] \ddot{\theta} + (W_m + W_p) \frac{l}{2} \cdot \theta + F_d \cdot \frac{l}{2}$$

Besar simpangan (x) yang terjadi pada mekanisme linear generator, dapat dicari dengan persamaan respon pada magnet. Nilai tersebut dapat diperoleh melalui hubungan antara gaya gelombang dan persamaan sinusoidal pada gelombang;

*Tugas Akhir*

*Bidang Studi Desain*

*Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS*

Persamaan gaya gelombang terhadap fungsi waktu:

$$F_{w(t)} = F_w \sin \omega_f \cdot t$$

dengan  $F_w = \frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda}$

dan persamaan amplitudo mekanisme:

$$X = \frac{F_w}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot g}{2} - \frac{2J_0}{l} \cdot \omega_f^2\right)^2 + (c \cdot \omega_f)^2}}$$

Maka besar simpangan (x) dan kecepatan magnet yang bergerak melewati kumparan adalah:

$$x = x_{(t)} = X \sin \omega_f \cdot t$$

$$v = \dot{x}_{(t)} = \omega_f X \cos \omega_f \cdot t$$

Berdasarkan simpangan yang terjadi pada mekanisme *linear generator*, maka pada penelitian ini panjang kumparan yang divariasikan ada 3 (tiga) macam, yaitu 15mm, 20mm dan 25mm, sedangkan variasi jumlah lilitan yang digunakan ada 3 (tiga) macam juga yaitu 1000 lilitan, 1500 lilitan dan 2000 lilitan.

Sehingga didapatkan power:

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) v^2$$

dan voltase yang dihasilkan mekanisme:

$$\varepsilon_{ggl} = B \cdot l \cdot v$$

Berdasarkan persamaan di atas, maka pada penelitian ini akan dilihat pengaruh dari perbedaan panjang kumparan dan jumlah lilitan pada daya dan voltase yang dihasilkan oleh mekanisme *linear generator*.

### 3.4 Tahap Pengujian

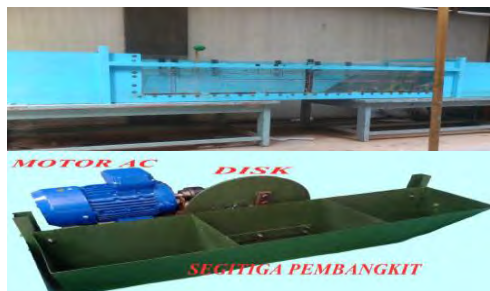
Pengujian Mekanisme dengan variasi titik tumpu lengan dan massa pelampung untuk mengetahui pengaruh hubungan input output antara energi yang dihasilkan oleh gelombang dan voltase (tegangan) yang dihasilkan oleh magnet sebagai elektromagnetik.

#### 3.4.1 Peralatan Pengujian

Untuk melakukan studi eksperimental pada PLTGL ini dibutuhkan beberapa peralatan pengujian.

##### 1. Kolam

Kolam yang digunakan untuk pengujian mekanisme PLTGL dibuat dengan skala laboratorium dengan ukuran panjang lebar dan tinggi berturut turut adalah 5 meter, 1 meter dan 1 meter. Mekanisme pembuat gelombang menggunakan motor dengan memasang piringan pada ujung porosnya.



Gambar 3.8. Kolam Simulasi Gelombang dan Mekanisme Pembuat Gelombang



## 2. Mekanisme PLTGL

Pada gambar 3.9 menunjukkan model mekanisme PLTGL lengkap dengan komponen pendukungnya. Model PLTGL ini terdiri dari 1 pelampung, 1 lengan, dan ditopang oleh 1 buah engsel yang terletak pada bagian tengah batang.



Gambar 3.9. Mekanisme PLTGL tipe pengungkit

## 3. Digital Storage Oscilloscope

*Digital Storage Oscilloscope* dengan merk UNI-T UT2062C digunakan untuk merekam data tegangan yang dihasilkan oleh Simulator PLTGL . Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan generator terhadap waktu.



Gambar 3.10. *Digital Storage Oscilloscope.*

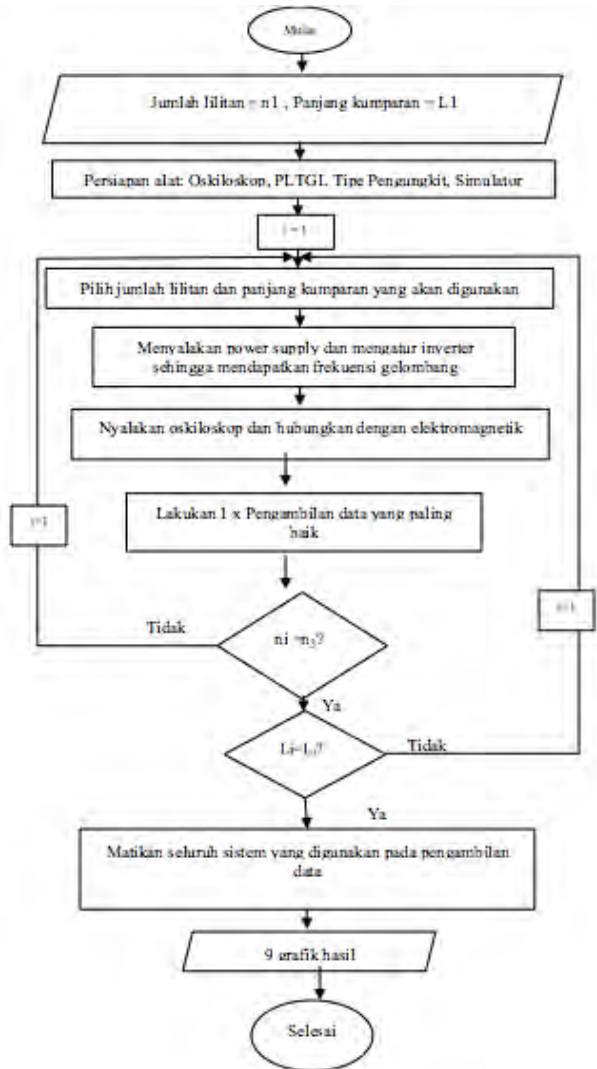
---

### **3.4.2 Pengambilan Data**

Pengambilan data PLTGL ini dilakukan sebanyak beberapa kali sehingga didapatkan hasil yang paling baik barulah dilakukan tahap pengolahan data. Dimana dilakukan untuk setiap masing-masing variasi pengujian yaitu, variasi panjang kumparan dan variasi jumlah lilitan.

#### **3.4.2.1 Diagram Alir Pengambilan Data**

Langkah – langkah dalam mengambil data pengujian PLTGL Tipe pengungkit dapat disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar di bawah ini



Gambar 3.11. Diagram alir pengambilan data

### 3.5 Format Lembar Pengambilan Data

Variasi panjang kumparan pada penelitian ini ada 3 kondisi yaitu:

1. Panjang kumparan  $L_1=15$  mm.
2. Panjang kumparan  $L_2=20$  mm.
3. Panjang kumparan  $L_3=25$  mm.

sedangkan variasi jumlah lilitan pada penelitian ini adalah:

1. Jumlah lilitan  $N_1=1000$  lilitan.
2. Jumlah lilitan  $N_2=2000$  lilitan.
3. Jumlah lilitan  $N_3=3000$  lilitan.

Lembar hasil pengambilan data digunakan untuk mencatat data voltase keluaran yang dihasilkan oleh mekanisme.

Tabel 3.1. Contoh Tabel Data Hasil Pengujian

Panjang kumparan	Jumlah lilitan		
	1000	2000	3000
15 mm			
20 mm			
25 mm			

### 3.6 Analisa dan Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari hasil pengujian akan diolah sehingga hasil pengujian akan dapat ditunjukkan dalam bentuk grafik.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

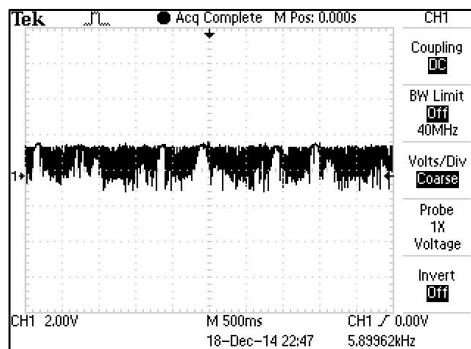
## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengambilan dan Pengolahan Data

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan oscilloscope sebagai alat yang mengukur hasil tegangan yang dibangkitkan oleh mekanisme *pltlg tipe pengungkit*. Mekanisme ini memanen energi dari gelombang laut yang kemudian akan menghasilkan energi listrik dari magnet dan kumparan akibat adanya gerak *heave* pada pelampung yang dibangkitkan oleh gelombang. Mekanisme ini menggunakan variasi kumparan sebanyak 9 kumparan dengan variasi panjang  $L1 = 15$  mm,  $L2 = 20$  mm,  $L3 = 25$  mm dan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan dan 3000 lilitan.

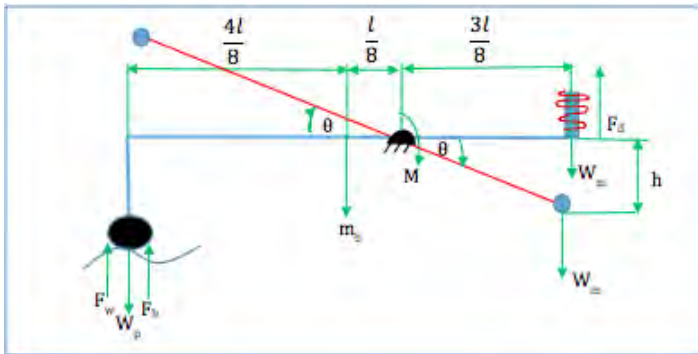
Hasil dari pengambilan data didapat grafik pada oscilloscope yang kemudian dioleh dengan matlab untuk kesembilan variasi kumparan.



Gambar 4.1 Data Percobaan pada *Oscilloscope*

## 4.2 Contoh perhitungan

Pada sub bab ini akan dibahas contoh – contoh perhitungan voltase bangkitan dari kajian pustaka yang telah dibahas



Gambar 4.2 Analisa Gaya pada Mekanisme

Gambar diatas merupakan kondisi lengan dengan titik tumpu berjarak 5/8 bagian dari pelampung, dimana pelampung sebagai daya input untuk menggerakkan magnet. Dari hasil pengujian, mekanisme dengan kondisi titik tumpu tersebut dapat berosiiasi secara optimal untuk menggerakkan linear generator.

Diketahui :

Massa Pelampung ( $m_p$ ) = 0.363 kg

Massa Lengan ( $m_b$ ) = 0.36 kg

Panjang Lengan ( $l$ ) = 0.5 m

Frekuensi Inverter ( $F$ ) = 13.5 Hz

Frekuensi Gelombang = 1.35 Hz

---

Periode Gelombang ( T )	= 0.74 sekon
Panjang Gelombang ( $\lambda$ )	= 1.08 m
Massa Jenis ( $\rho$ )	= 1000 kg/m <sup>3</sup>
Percepatan Gravitasi ( g )	= 9,81 kg m/s <sup>2</sup>
Massa Magnet (m <sub>m</sub> )	= 0.2 kg
Panjang Kawat Kumparan (L)	= 62,8 m
Hambatan Kawat Kumparan (R)	= 33.6 ohm

Voltase yang dihasilkan adalah :

a. Gaya Gelombang

$$\begin{aligned} F_w &= \frac{\rho_f \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{32\pi\lambda} \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 96.2361 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2 \times 0.01 \text{m}^2 \times 0.5625 \text{s}^2}{32 \times 3.14 \times 1.08} \\ &= 5,6638 \text{ N} \end{aligned}$$

b. Frekuensi Gelombang

$$\begin{aligned} \omega_f &= 2 \cdot \pi \cdot f \\ &= 2 \times 3.14 \times 1.35 \\ &= 8,478 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

c. Electric Damping

$$C_e = \frac{B^2 \cdot L^2}{R}$$



$$= \frac{(0,2 \text{ Wb/m}^2)^2 \cdot 62,8 \text{ m}^2}{33,6 \text{ ohm}}$$

$$= 4,695$$

d. Massa Ekuivalen

$$\begin{aligned} M_{\text{eq}} &= \left[ \frac{2m_b}{9} + \frac{m_b}{24} + \frac{25m_p}{24} + \frac{3m_m}{8} \right] l \\ &= \left[ \frac{2 \times 0,36 \text{ kg}}{8} + \frac{0,36 \text{ kg}}{24} + \frac{25 \times 0,363 \text{ kg}}{24} + \right. \\ &\quad \left. \frac{3 \times 0,2 \text{ kg}}{8} \right] 0,5 \text{ m} \\ &= 0,279 \text{ kg} \end{aligned}$$

e. Damping Ekuivalen

$$\begin{aligned} C_{\text{eq}} &= \left( \frac{B^2 \cdot L^2}{R} \right) \frac{3l}{8} \\ &= \left( \frac{(0,2 \text{ Wb/m}^2)^2 \cdot 62,8 \text{ m}^2}{33,6 \text{ ohm}} \right) \frac{3 \cdot 0,5 \text{ m}}{8} \\ &= 0,88032 \end{aligned}$$

f. Pegas Ekuivalen

$$\begin{aligned} K_{\text{eq}} &= \left( \frac{5}{3} m_p + m_m \right) g \\ &= \left( \frac{5}{3} 0,363 \text{ kg} + 0,2 \text{ kg} \right) 9,81 \text{ m/s}^2 \\ &= 7,89705 \text{ N} \end{aligned}$$

g. Kecepatan Gerak Magnet

Dari gaya ombak yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi gerak *heave* dengan frekuensi gelombang 1,35 hz

$$v = \dot{x}(t) = \omega_f X \cos \omega_f \cdot t$$

Dimana X adalah gaya gelombang laut yang dihasilkan

$$X = \frac{F_o}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

Maka didapat

$$v = 3,168 \text{ m/s}$$

#### h. Kuat medan Magnet

Kuat medan magnet dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$B = \frac{\mu_0 IN}{L}$$

$$B = \frac{(1.26 \times 10^{-6}) \times 0.148 \times 1000}{0.015}$$

$$= 0.012432 \text{ Wb/m}^2$$

#### i. Voltase yang Dihasilkan

$$E_{\text{ind}} = B \cdot L \cdot v$$

$$= 0,0123 \text{ Wb/m}^2 \cdot 62,8 \text{ m} \cdot 3,1687 \text{ m/s}$$

$$= 2,466 \text{ volt}$$

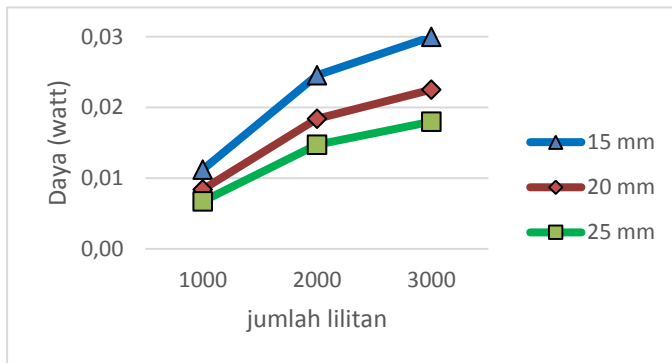
Dari contoh perhitungan diatas diperoleh voltase untuk jumlah lilitan 1000 dengan panjang kumparan 15 mm diperoleh voltase sebesar 9,2056 volt. Sedangkan perhitungan voltase untuk variasi yang lain pada mekanisme ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.1 Voltase bangkitan dari perhitungan teoritis

Panjang kumparan	Jumlah lilitan	$l$ (m)	$B$ (wb/m <sup>2</sup> )	$v$ (m/s)	Eind (volt)	P (watt)
15 mm	1000	62.8	0.0123	3.1687	2.4661	0.0112
	2000	125.6	0.0182	2.3538	5.3965	0.0245
	3000	188.4	0.0201	1.7419	6.5953	0.0299
20 mm	1000	62.8	0.0092	3.1687	1.8495	0.0084
	2000	125.6	0.0136	2.3538	4.0474	0.0183
	3000	188.4	0.0150	1.7419	4.9464	0.0299
25 mm	1000	62.8	0.0074	3.1687	1.4796	0.0067
	2000	125.6	0.0109	2.3538	3.2379	0.0147
	3000	188.4	0.0120	1.7419	3.9571	0.0179

Secara teoritis dapat di plot ke grafik untuk memperjelas trendline dari voltase bangkitan tersebut terhadap variasi jumlah lilitan. Daya secara teoritis juga dapat di plot kan ke grafik untuk memperjelas trendline dari daya terhadap variasi jumlah lilitan.

Untuk memperjelas hubungan antara variasi dengan daya yang dihasilkan, dapat dilihat pada grafik:



Gambar 4.3 Grafik daya hasil perhitungan secara teoritis

Dari grafik baik voltase maupun daya hasil perhitungan secara teoritis diatas dapat dilihat bahwa dengan semakin banyaknya jumlah lilitan maka nilai voltase dan daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori – teori yang telah dibahas pada pembahasan sebelumnya.

### 4.3 Data Pengujian

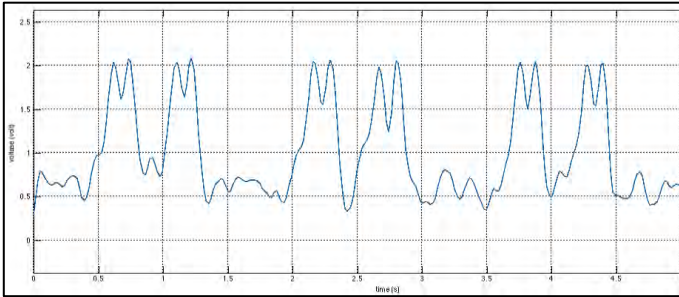
Pada percobaan, data yang didapatkan adalah data voltase, data voltase tersebut dievaluasi baik dari voltase AC maupun voltase DC, data yang didapat kemudian diolah pada matlab untuk mendapat nilai voltase RMS bangkitan yang kemudian akan dibandingkan dengan perhitungan secara teoritis.

Sebagai contoh diambil data dari mekanisme pembangkit daya dengan panjang kumparan  $L1 = 25$  mm, dan jumlah lilitan 3000 lilitan. Dari oscilloscope didapatkan data voltase bangkitan dan sebuah grafik. Dapat dilihat pada gambar :

*Tugas Akhir*

*Bidang Studi Desain*

*Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS*

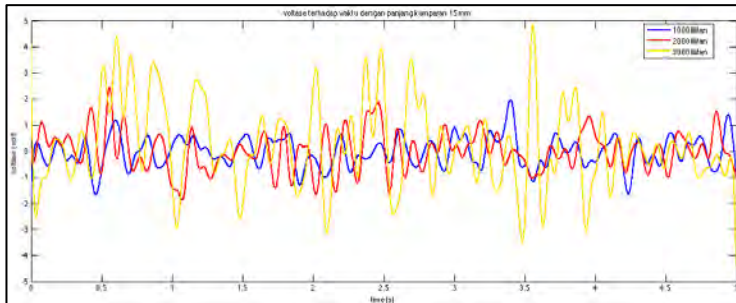


Gambar 4.4 Grafik voltase DC output dengan matlab

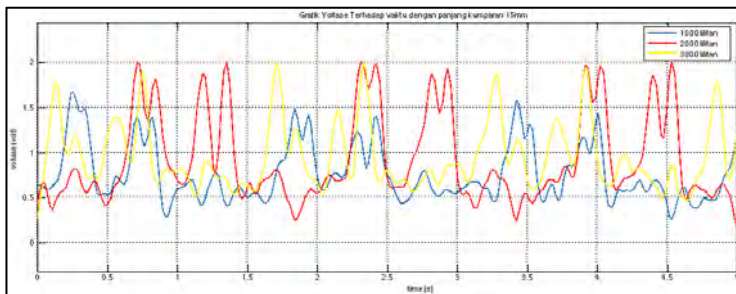
Dari oscilloscope didapat 2500 data voltase yang direkam selama 5 detik. Data tersebut diolah dengan matlab sehingga mendapat voltase RMS sebesar 0.9975 volt.

## 4.4 Grafik Pengujian

### 4.4.1 Grafik voltase untuk panjang kumparan 15 mm ( L1 ) dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, 3000 lilitan.



Gambar 4.5 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk panjang kumparan 15 mm

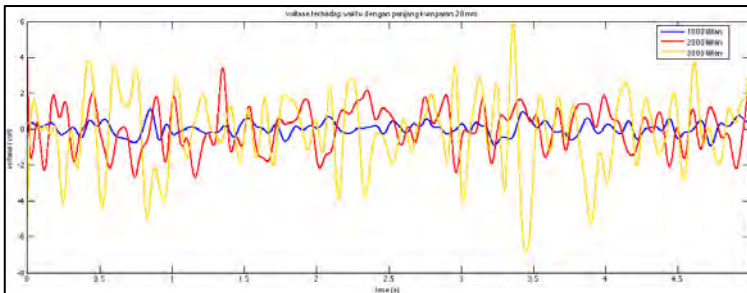


Gambar 4.6 Grafik voltase fungsi waktu untuk panjang kumparan 15 mm

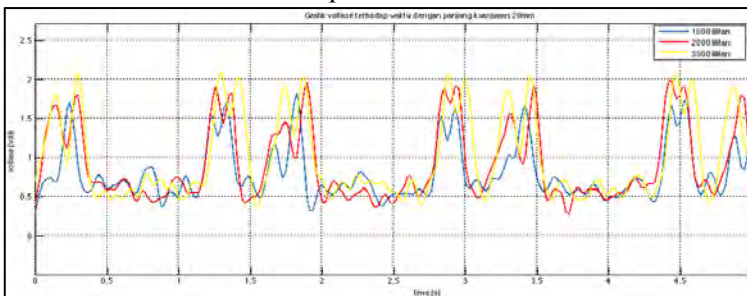
Dari data yang diperoleh dari osciloscope kemudian diolah dengan matlab untuk mendapat grafik fungsi waktu selama 5 detik untuk variasi panjang lilitan 15 mm, dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, dan 3000 lilitan. didapatkan voltase AC

secara berurutan yaitu 0.5566 volt, 1.1674 volt, 2.0571 volt. Sedangkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.8755 volt, 0.9654 volt, 0.9785 volt.

#### 4.4.2. Grafik voltase untuk panjang kumparan 20 mm ( L2 ) dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, dan 3000 lilitan.



Gambar 4.7 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk panjang kumparan 20 mm

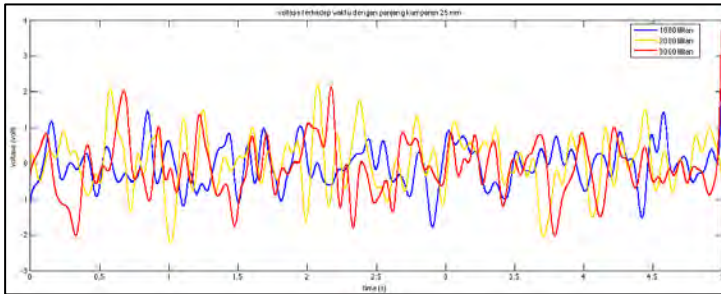


Gambar 4.8 Grafik voltase fungsi waktu untuk panjang kumparan 20 mm

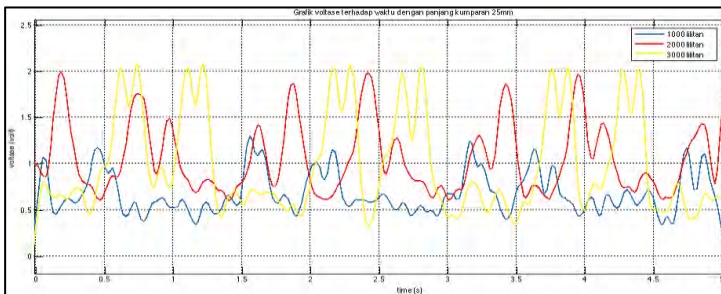
Dari grafik voltase fungsi waktu diatas didapatkan voltase RMS dari pengambilan data selama 5 detik untuk panjang lilitan 20 mm, dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, dan 3000 lilitan didapatkan voltase AC secara berurutan yaitu 0.577 volt,

0.7324 volt, 1.589 volt. Sedangkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.8978 volt, 0.9677 volt, 0.9986 volt.

#### 4.4.3. Grafik voltase untuk panjang kumparan 25 mm ( L3 ) dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, dan 3000 lilitan.



Gambar 4.9 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk panjang kumparan 25 mm



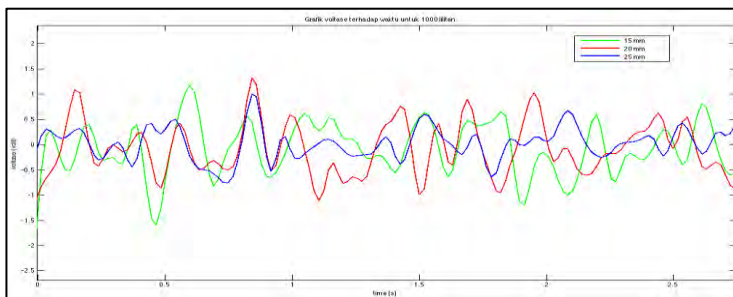
Gambar 4.10 Grafik voltase DC fungsi waktu untuk panjang kumparan 25 mm

Dari grafik voltase fungsi waktu diatas didapatkan voltase RMS dari pengambilan data selama 5 detik untuk panjang lilitan 25 mm, dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, 2000 lilitan, dan 3000 lilitan didapatkan voltase AC secara berurutan yaitu 0.5656 volt,

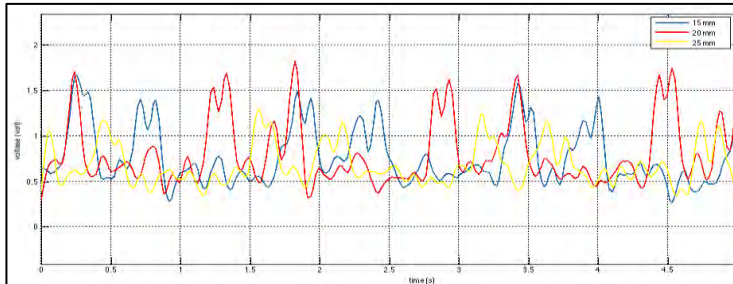


0.7589 volt, 0.7638 volt. Sedangkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.8268 volt, 1.0258 volt, 0.9975 volt.

#### 4.4.4. Grafik voltase untuk Jumlah lilitan 1000 lilitan, dengan $L1 = 15$ mm, $L2 = 20$ mm, dan $L3 = 25$ mm.



Gambar 4.11 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk 1000 lilitan



Gambar 4.12 Grafik voltase DC fungsi waktu untuk 1000 lilitan

Dari grafik voltase fungsi waktu diatas didapatkan voltase RMS dari pengambilan data selama 5 detik untuk jumlah lilitan 1000 lilitan, dengan panjang kumparan 15 mm, 20 mm, dan 25 mm didapatkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.8755 volt, 0.8978 volt, 0.8268 volt.

Dari grafik voltase yang dihasilkan, untuk jumlah lilitan 1000 lilitan, dan panjang kumparan yang berbeda didapat voltase yang terbesar pada panjang kumparan 20 mm yaitu sebesar 0.8978 volt hal ini tidak sesuai dengan teori karena berdasar teori semakin bertambah panjang kumparan maka semakin kecil voltase yang dibangkitkan. Dimana hal ini berdasar dengan teori elektromagnet rangkaian solenoidal yang persamaannya adalah sebagai berikut :

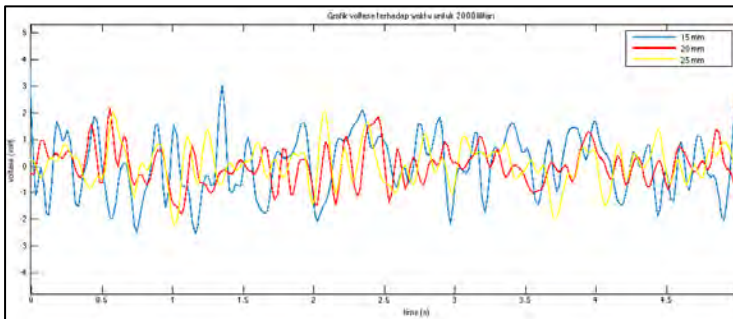
$$B = \frac{\mu_0 IN}{L}$$

Dapat kita lihat dengan bertambahnya nilai  $L$  maka nilai  $B$  akan semakin bertambah kecil. Hal ini nantinya akan berpengaruh pada voltase bangkitan setelah nilai  $B$  disubstitusikan ke persamaan

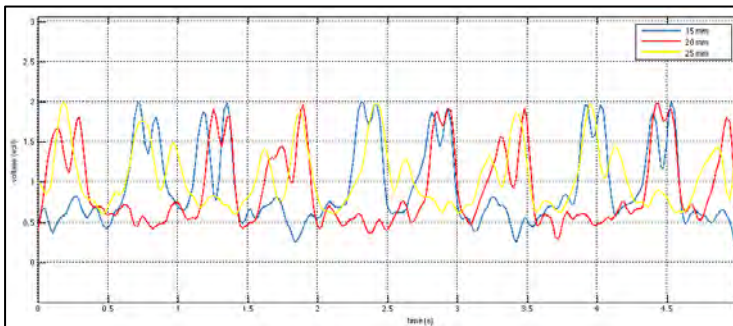
$$E = B l v .$$

Dari persamaan ini dapat kita lihat dengan semakin bertambah kecilnya nilai  $B$  maka nilai  $E$  atau voltase bangkitannya juga akan semakin kecil.

#### 4.4.5. Grafik voltase untuk Jumlah lilitan 2000 lilitan, dengan $L1 = 15\text{ mm}$ , $L2 = 20\text{ mm}$ , $L3 = 25\text{ mm}$ .



Gambar 4.13 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk 2000 lilitan



Gambar 4.14 Grafik voltase DC fungsi waktu untuk 2000 lilitan

Dari grafik voltase fungsi waktu diatas didapatkan voltase RMS dari pengambilan data selama 5 detik untuk jumlah lilitan 2000 lilitan, dengan panjang kumparan 15 mm, 20 mm, dan 25

mm didapatkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.9654 volt, 0.9677 volt, 1.0258 volt

Dari grafik voltase yang dihasilkan, untuk jumlah lilitan 2000 lilitan, dan panjang kumparan yang berbeda didapat voltase yang terbesar pada panjang kumparan 25 mm yaitu sebesar 1.0258 volt. Hal ini terjadi karena semakin bertambah panjang kumparan maka semakin kecil voltase yang dibangkitkan. Dan hal ini juga didukung dengan teori elektromagnet rangkaian solenoidal yang persamaannya adalah sebagai berikut :

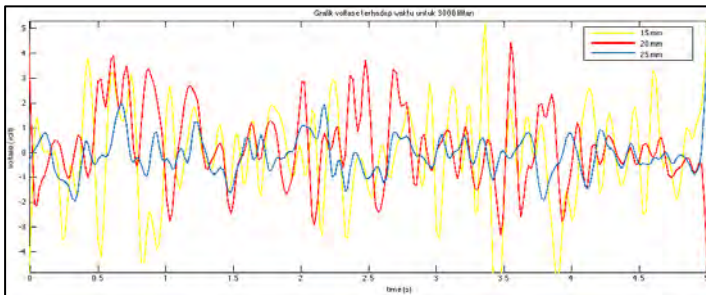
$$B = \frac{\mu_0 IN}{L}$$

Dapat kita lihat dengan bertambahnya nilai  $L$  maka nilai  $B$  akan semakin bertambah kecil. Hal ini nantinya akan berpengaruh pada voltase bangkitan setelah nilai  $B$  disubstitusikan ke persamaan

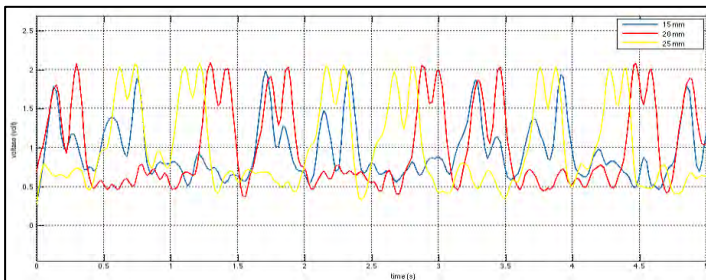
$$E = B l v .$$

Dari persamaan ini dapat kita lihat dengan semakin bertambah kecilnya nilai  $B$  maka nilai  $E$  atau voltase bangkitannya juga akan semakin kecil.

#### 4.4.6. Grafik untuk Jumlah lilitan 3000 lilitan, dengan $L1 = 15$ mm, $L2 = 20$ mm, $L3 = 25$ mm.



Gambar 4.15 Grafik voltase AC fungsi waktu untuk 3000 lilitan



Gambar 4.16 Grafik voltase DC fungsi waktu untuk 3000 lilitan

Dari grafik voltase fungsi waktu diatas didapatkan voltase RMS dari pengambilan data selama 5 detik untuk jumlah lilitan 3000 lilitan, dengan panjang kumparan 15 mm, 20 mm, dan 25 mm didapatkan voltase DC RMS secara berurutan adalah 0.9785 volt, 0.9986 volt, 0.9975 volt

Dari grafik voltase yang dihasilkan, untuk jumlah lilitan 3000 lilitan, dan panjang kumparan yang berbeda didapat voltase yang terbesar pada panjang kumparan 20 mm yaitu sebesar 0.9986 volt. Hal ini terjadi karena semakin bertambah panjang kumparan maka semakin kecil voltase yang dibangkitkan. Dan hal ini juga didukung dengan teori elektromagnet rangkaian solenoidal yang persamaannya adalah sebagai berikut :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{L}$$

Dapat kita lihat dengan bertambahnya nilai  $L$  maka nilai  $B$  akan semakin bertambah kecil. Hal ini nantinya akan berpengaruh pada voltase bangkitan setelah nilai  $B$  disubstitusikan ke persamaan

$$E = B l v .$$

Dari persamaan ini dapat kita lihat dengan semakin bertambah kecilnya nilai  $B$  maka nilai  $E$  atau voltase bangkitannya juga akan semakin kecil.

## 4.5 Pembahasan Grafik

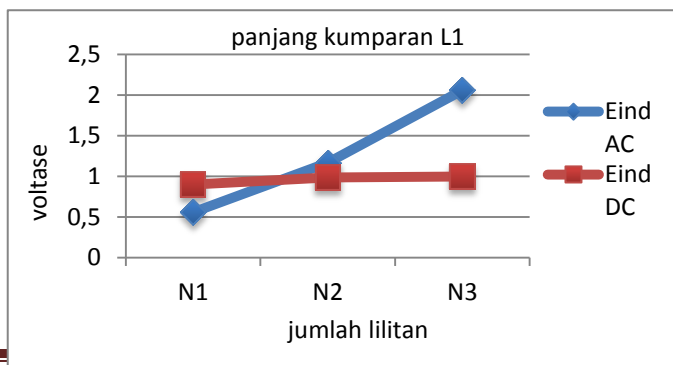
### 4.5.1 Perbandingan Voltase AC dan DC yang dihasilkan

Tabel 4.2 Perbandingan Voltase DC dengan AC  
Pengujian

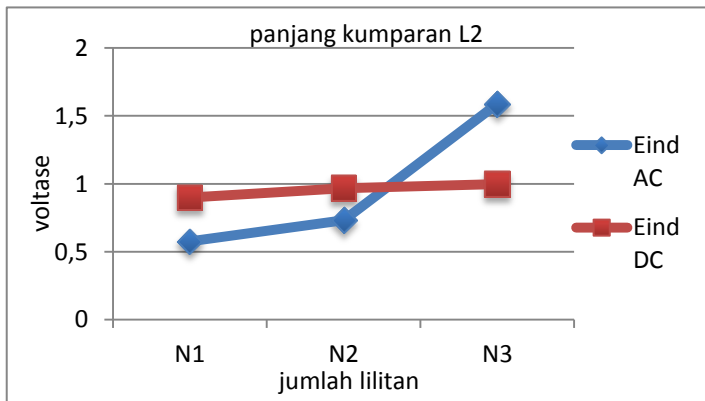
Panjang kumparan	Jumlah lilitan	Eind DC (volt)	Eind AC (volt)
15 mm	1000	0.8988	0.556

	2000	0.986	1.1674
	3000	0.9975	2.0571
20 mm	1000	0.8978	0.577
	2000	0.9677	0.7324
	3000	0.9986	1.589
25 mm	1000	0.8755	0.5656
	2000	0.9654	0.7589
	3000	0.9785	0.7638

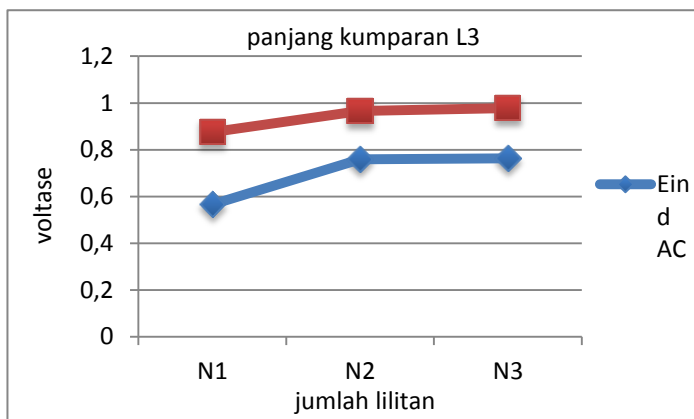
Dari tabel diatas terlihat bahwa nilai voltase RMS terbesar pengujian adalah pada variasi panjang kumparan L2 dengan jumlah lilitan N3, hal ini tidak sesuai dengan analisa secara teoritis, terjadi karena garis gaya magnetik tidak dapat memotong kumparan sampai diameter terluar dari kawat kumparan itu sendiri. Untuk melihat perbedaan voltase AC dan DC yang dihasilkan dengan pengaruh panjang kumparan dan jumlah lilitan, dapat dilihat pada grafik :



Gambar 4.17 Grafik perbandingan voltase AC dan DC hasil pengujian dengan panjang kumparan 15 mm



Gambar 4.18 Grafik perbandingan voltase AC dan DC hasil pengujian dengan panjang kumparan 20 mm

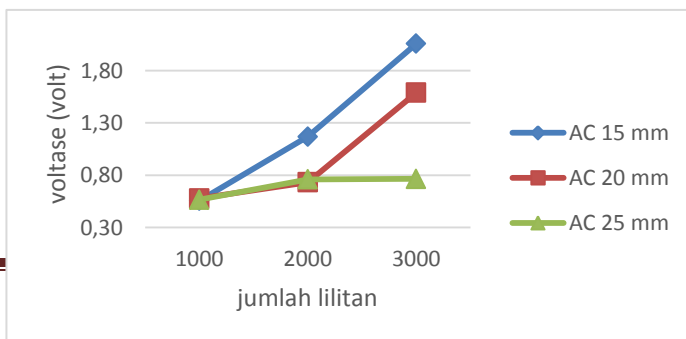




Gambar 4.19 Grafik perbandingan voltase AC dan DC hasil pengujian dengan panjang kumparan 25 mm

Dari ketiga grafik diatas, baik voltase AC maupun DC, secara umum sudah sesuai dengan grafik teoritis, dimana semakin banyak lilitan, maka voltase yang dihasilkan juga semakin besar, panjang lilitan 15 mm juga memiliki rata rata voltase yang paling tinggi, apabila dibandingkan dengan 20 mm dan 25 mm.

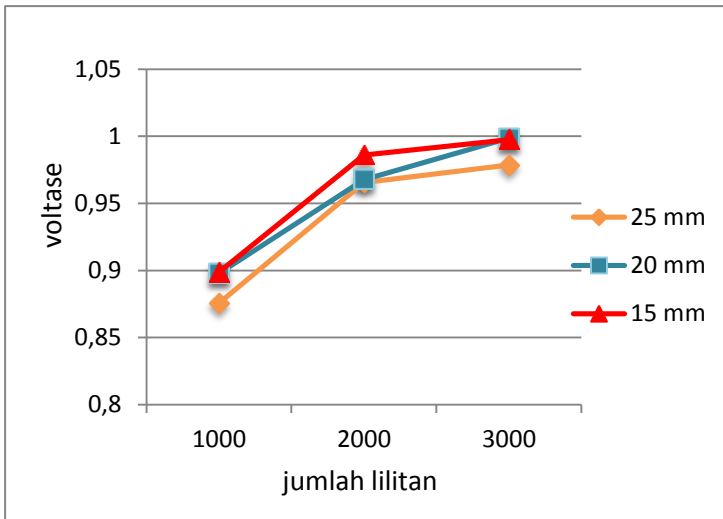
Dapat dilihat pada grafik diatas, karakter voltase DC lebih stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan nilainya, tidak seperti arus AC, walaupun memiliki voltase RMS yang tinggi, namun cenderung tidak stabil. Pada panjang kumparan 25 mm terlihat bahwa grafik voltase untuk arus DC nilainya semua berada diatas nilai voltase AC, hal ini bisa terjadi karena beberapa faktor, apabila dievaluasi dari gerakan translasi magnet itu sendiri, dimana jarak bebas magnet pada ujung kumparan 25 mm lebih pendek daripada panjang kumparan dengan variasi 15 mm dan 20 mm, sehingga nilai fluks magnetik yang terjadi pada ujung ujung kumparan tersebut menjadi berbeda nilainya. Hal ini juga bisa terjadi karena pada rangkaian inverter, kapasitor menyimpan energi untuk beberapa saat, sebelum akhirnya voltase DC tersebut dibaca menggunakan oscilloscope, sehingga kemungkinan ada energi sisa di dalam kapasitor tersebut yang pada akhirnya secara berfungsi untuk menstabilkan voltase DC keluaran yang dihasilkan.



Akhir  
Desain

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS

Gambar 4.20 Grafik voltase AC hasil pengujian



Gambar 4.21 Grafik voltase DC hasil pengujian

Grafik diatas adalah grafik voltase RMS AC dan voltase RMS DC, secara umum sudah sesuai dengan analisa teoritis sebelumnya, baik dievaluasi dari AC maupun DC, dimana panjang kumparan 15 mm menghasilkan voltase yang paling besar jika dibandingkan dengan 20 mm maupun 25 mm.

Grafik diatas juga sudah sesuai dengan kondisi secara teoritis dimana grafik profil voltase terhadap waktu untuk kondisi AC berbentuk sinusoidal, sedangkan voltase DC berbentuk parabola yang terbuka ke bawah.

Dapat terlihat voltase DC memiliki 2 puncak pada seluruh grafik pengujian, sedangkan

voltase AC hanya memiliki 1 puncak, hal ini memungkinkan voltase DC dapat diukur besar arusnya karena voltase yang dihasilkan cenderung lebih stabil, tidak seperti voltase AC yang terkadang berada pada titik nol dan cenderung tidak stabil. Dalam hal ini voltase DC cenderung lebih menguntungkan.

Semakin besar jumlah lilitan maka voltase yang dihasilkan juga semakin besar, tetapi pada panjang kumparan 15 mm terjadi penurunan voltase pada lilitan 3000. Hal ini mungkin terjadi, dimana kuat medan magnet tidak memotong kumparan sampai ke diameter terluar dari jumlah lilitan 3000. Sebaliknya yang terjadi pada panjang kumparan, semakin panjang kumparan yang digunakan maka semakin kecil voltase yang dibangkitkan.

Dari grafik dan tabel diatas terlihat bahwa voltase terbesar dihasilkan oleh kumparan dengan panjang 20 mm dan jumlah lilitan 3000 lilitan yaitu sebesar 0,9986 Volt. Dan yang terkecil dihasilkan oleh kumparan dengan panjang kumparan 25 mm dan jumlah lilitan 1000 lilitan yaitu sebesar 0,8755 Volt.

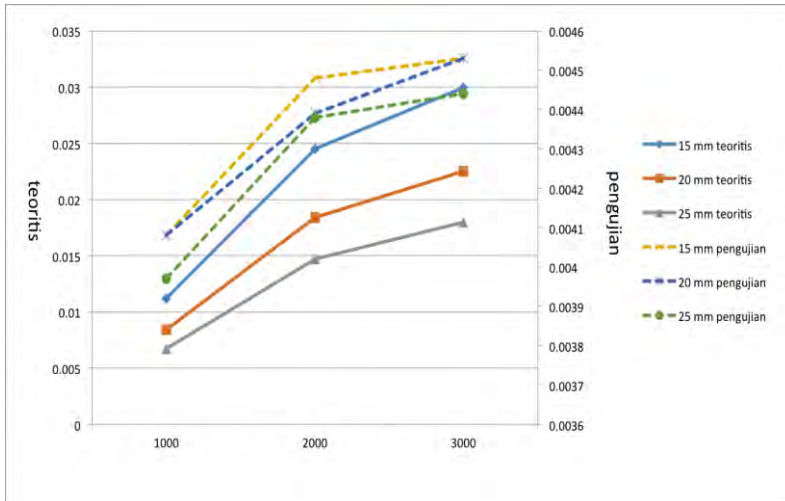
#### 4.6 Hasil perbandingan analisa teori dengan pengujian

Dari nilai analisa secara teori yang telah dihitung, dapat dilihat hasil perbandingan antara analisa secara teori dengan hasil yang diperoleh dari pengujian. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.3 Perbandingan Power hasil perhitungan dengan pengujian

Panjang Kumparan	Jumlah Lilitan	P Teoritis (watt)	P Pengujian (watt)
15 mm	1000	0.0112	0.00408
	2000	0.0245	0.00448
	3000	0.0299	0.00453
20 mm	1000	0.0084	0.00408
	2000	0.0183	0.00439
	3000	0.0224	0.00453
25 mm	1000	0.0067	0.00397
	2000	0.0147	0.00438

	3000	0.0179	0.00444
--	------	--------	---------



Gambar 4.22 Grafik daya Teoritis VS hasil pengujian

Dari hasil perbandingan tersebut tampak bahwa hasil analisa teori lebih besar dari pada hasil pengujian. Hal ini dapat terjadi karena pada saat percobaan terdapat banyak kerugian – kerugian energi yang tidak diperhitungkan. Antara lain gesekan yang terjadi antara magnet dengan tabung pipa dan hambatan pada kawat kumparan itu sendiri.

Selain itu perbedaan yang terjadi antara power bangkitan dari pengujian dengan perhitungan teori disebabkan karena pada saat pengolahan data pengujian diambil voltase RMS, sedangkan pada perhitungan yang didapatkan adalah voltase maksimum, sehingga power yang didapat sangat berbeda.

#### 4.7 Effisiensi Mekanisme

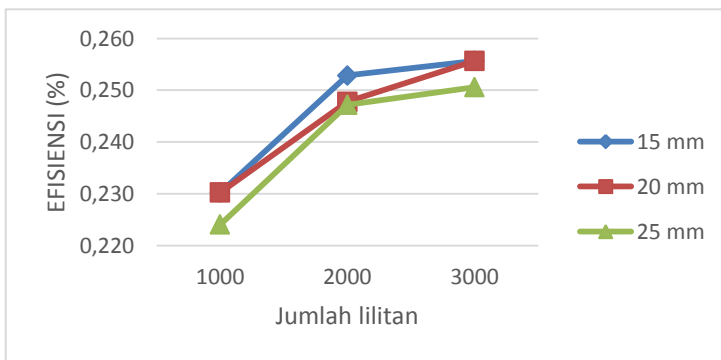
Untuk mengetahui effisiensi dari variasi panjang kumparan dan jumlah lilitan pada mekanisme PLTGL ini maka dilakukan sebuah analisa dengan grafik effisiensi. Grafik ini menjelaskan tentang ombak sebagai daya input untuk menggerakkan mekanisme, dan daya listrik yang kemudian dihasilkan. Semuanya dalam satuan watt.

Tabel 4.4 Tabel Data Effisiensi Variasi Jumlah

Panjang Kumparan	Jumlah Lilitan	Daya Ombak (watt)	Daya Eksperimen (watt)	Effisiensi (%)
15 mm	1000	1.7718	0.00408	0.230
	2000	1.7718	0.00448	0.253
	3000	1.7718	0.00453	0.256
20 mm	1000	1.7718	0.00408	0.230
	2000	1.7718	0.00439	0.248
	3000	1.7718	0.00453	0.256
25 mm	1000	1.7718	0.00397	0.224
	2000	1.7718	0.00438	0.247

	3000	1.7718	0.00444	0.251
--	------	--------	---------	-------

Pada grafik dibandingkan daya yang diberikan ( $P_{\text{wave}}$ ) dibandingkan dengan daya hasil pengambilan data ( praktikum ) dalam satuan watt. Effisiensi dapat dihitung dengan cara membagi nilai daya secara praktikum terhadap daya yang diberikan ( $P_{\text{wave}}$ ) , dikalikan dengan seratus persen.



Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Effisiensi Variasi

Gambar 4.23 menunjukkan detail grafik efisiensi variasi panjang kumparan dan jumlah lilitan dimana semakin banyak jumlah lilitan dengan ukuran panjang 15 mm menghasilkan voltase dan daya yang terbesar. Dimana efisiensi terbesar pada variasi panjang kumparan 20 mm dengan jumlah 3000 lilitan yaitu 0.256 % dan efisiensi terkecil pada panjang kumparan 25 mm dengan jumlah 1000 lilitan yaitu sebesar 0.23 %. Nilai efisiensi didapatkan dari yaitu pembagian daya eksperimen dibagi dengan daya dari ombak dikalikan seratus persen. Nilai efisiensi yang diperoleh sangat kecil dikarenakan nilai error atau *losses* pada mekanisme sangat besar. Daya gelombang laut

---

didapatkan dari persamaan  $\frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi}$ , sehingga nilai  $P_{\text{wave}}$  secara teoritis yang digunakan adalah sebesar 1,7718 watt.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

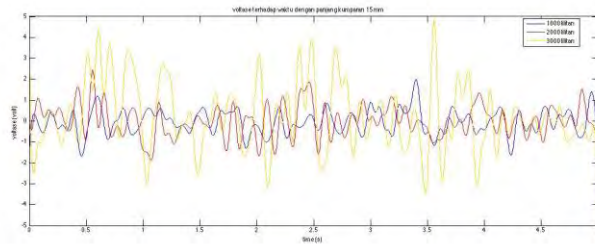
Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL tipe pengungkit dengan variasi panjang kumparan dan jumlah lilitan, didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Kondisi titik tumpu ideal lengan pengungkit pada mekanisme ini adalah pada jarak  $5/8$  bagian dari pelampung sebagai daya inputan. Kondisi tersebut memungkinkan linear generator dapat beresilasi secara optimal.
2. Nilai voltase dan daya akan meningkat seiring bertambahnya jumlah lilitan pada mekanisme linear generator pada mekanisme PLTGL ini.
3. Untuk kondisi mekanisme ini, penggunaan rangkaian penyearah untuk mendapatkan voltase DC lebih menguntungkan, karena voltase yang dihasilkan memiliki RMS yang lebih tinggi dan lebih stabil.
4. Voltase terkecil terjadi pada variasi panjang kumparan 25 mm dengan jumlah lilitan 1000 lilitan, yaitu sebesar 0.8755 volt.
5. Voltase terbesar terjadi pada variasi panjang kumparan 20 mm dengan jumlah lilitan 3000 lilitan, yaitu sebesar 0.9986 volt.
6. Efisiensi terbesar terjadi pada panjang kumparan 20 mm dengan jumlah lilitan 3000 lilitan yaitu sebesar 0.256 %.
7. Efisiensi terkecil terjadi pada panjang kumparan 25 mm dengan jumlah lilitan 1000 lilitan yaitu sebesar 0.224 %.

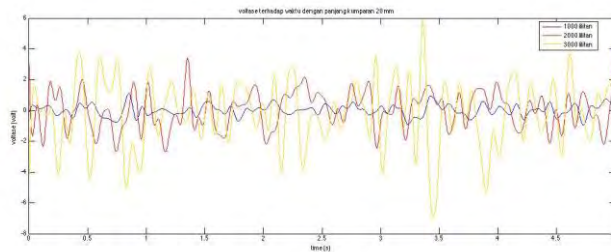
## 5.2 Saran

1. Diperlukan lengan mekanisme dengan ukuran yang lebih panjang agar terjadi resonansi atau kesamaan nilai frekuensi natural yang terjadi pada ombak dengan frekuensi natural pada mekanisme PLTGL.
2. Perlu dilakukan penambahan pegas dengan kekakuan tertentu untuk membantu lengan agar dapat berosilasi dengan lebih optimal.
3. Dilakukan proses *alignment* antara poros pada lengan mekanisme dengan housing sehingga didapatkan kesatusumbuan poros yang akan mengurangi losses dan meningkatkan efisiensi pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit.
4. Penambahan mekanisme pengungkit, ditempatkan pada panjang gelombang dan amplitude gelombang tertentu, diharapkan voltase yang dibangkitkan tiap mekanisme akan saling mengisi, sehingga nilai voltase tidak pada titik nol.
5. Bearing yang digunakan tahan air sehingga mencegah korosi
6. Simulator pembuat gelombang memiliki peredam yang lebih baik, sehingga mencegah gelombang balik sehingga pengamatan dapat dilakukan lebih lama.

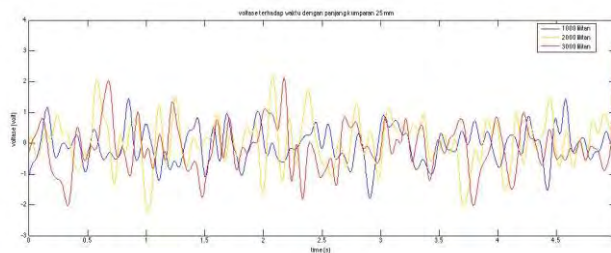
## Lampiran



**Gambar lampiran 1** Grafik Voltase AC dengan panjang kumparan 15 mm



**Gambar lampiran 2** Grafik Voltase AC dengan panjang kumparan 20 mm



**Gambar lampiran 3** Grafik Voltase AC dengan panjang kumparan 25 mm

---

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hendrowati, Wiwiek, Bambang Daryanto W., Harus Laksana G. **“Pengaruh Variasi Panjang Kumparan Terhadap Voltase yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting”** 978-602-97742-0-7.
- [2] Kramer, Morten., **“The wave Energy Converter Wave Star , A Multi Point Absorber System”**. Aalborg University ( AAU ), Denmark., 2006
- [3] Kramer, Morten., **“Status on the Wave Star Energy Converter Development”**. Aalborg University ( AAU ), Denmark., 2006
- [4] Khaligh, Alireza., Omar C. Onar, **“Energy Harvesting : Solar, Wind, and Ocean, Energy Conversion Systems”**, CRC Press, NewYork., 2010.
- [5] Marquis, Kramer, Frigaard., **“Performance Evaluation of The Wave Star Prototype “** ., EWTEC Conference, Southampton. United Kingdom., 2011
- [6] Rao, Singiresu, **”Mechanical Vibration,5th Edition”**, Pearson Education.Inc, United State of America, 2004
- [7] Reitz R. Jhon. **“Foundations of Electromagnetic Theory 3<sup>rd</sup> edition”**. Washington D.C, Inc : Adison-Wesley, 1979

## BIOGRAFI PENULIS



Doni Ardhi Dharmawan Lahir di Wonosobo pada tanggal 18 Juni 1991. Penulis merupakan putra kedua dari tiga bersaudara Yudha Satria dan Dody Kusuma. Penulis memulai pendidikan dasar di SDN 6 Wonosobo dan lulus pada tahun 2003, lalu melanjutkan studi ke SMPN 1 Wonosobo dan lulus pada tahun 2006, kemudian penulis melanjutkan studi ke SMAN 1 Wonosobo dan lulus pada tahun 2009. Setelah masa studi SMA selesai, penulis melanjutkan studi program Diploma Teknik Mesin UGM Yogyakarta pada jurusan Teknik Manufaktur dan mengambil Tugas Akhir dengan Topik Cooling tower dan lulus pada tahun 2012. Pada tahun 2012 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Desain. Penulis mengambil Topik Tugas Akhir Ocean Energy Harvesting dengan judul “Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme PLTGL Tipe Pengungkit Dengan Variasi Panjang Kawat Kumpan dan Jumlah Lilitan” Penulis memiliki motto hidup “Jalani dengan ikhlas dan selesaikan dengan berani” dengan harapan ilmu yang telah didapatkan dapat digunakan dan berguna untuk agama dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dibawah ini:

[doni.fiat.vespa@gmail.com](mailto:doni.fiat.vespa@gmail.com)